

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University  
Université Badji Mokhtar – Annaba  
Faculté de Technologie



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية التكنولوجيا

قسم الكهروميكانيك

Département Electromécanique

## Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

## Doctorat Troisième Cycle

Filière : Electromécanique

Spécialité : Mécatronique

Par :

**RAHLI CHOUAIB**

Thème :

## Conception, Optimisation, Gestion d'Énergie d'un Système Décentralisé de Pompage/ Dessalement / Climatisation Alimenté par des Sources Renouvelables

Thèse soutenue le 07-01-2026

Devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	CHEGHIB Hocine	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	OUADA Mehdi	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	TALBI Nabil	MCA	Université 20 Aout 1955, Skikda	Examineur
04	DJELLAD Abdelhak	MCA	ENSTI Annaba	Examineur
05	BENAMIRA Nadir	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
06	DEKHANE Azzeddine	MCA	ENSTI Annaba	Invité

# "تصميم وتحسين وإدارة الطاقة لنظام لا مركزي للضخ/التحلية/التكييف يعمل بمصادر الطاقة المتجددة"

الملخص:

إن أنظمة الطاقة، وخاصة تلك التي تعتمد على المصادر المتجددة، لها أداء يعتمد بشكل كبير على كفاءتها الشاملة، والتي تعتمد على كفاءة مراحل تحويل الطاقة المختلفة. ومن بين مصادر الطاقة المتجددة الأكثر واعدة هي الطاقة الشمسية، وخاصة في المناطق ذات مستويات عالية من أشعة الشمس، بسبب وفرتها وتوافرها. ومع ذلك، فإن أنظمة الطاقة الكهروضوئية غالباً ما يكون أداؤها محدوداً، ويرجع ذلك أساساً إلى انقطاع ضوء الشمس والخسائر المرتبطة بتحويل الطاقة. وفي هذا السياق، ثبت أن ضخ الطاقة الشمسية الكهروضوئية يشكل حلاً مناسباً بشكل خاص للمناطق الريفية المعزولة. ومن خلال تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وخفض تكاليف التشغيل، فإنه يساعد على تلبية احتياجات المياه للري والاستخدام المنزلي. تركز هذه الأطروحة على دراسة وتحسين نظامين مستقلين يعملان بمصدر الطاقة الشمسية. يركز الجزء الأول على نظام أحادي المرحلة يعتمد على عاكس شبه مصدر  $Z(qZSI)$ ، حيث يتم تنفيذ طريقة تحكم جديدة تعتمد على التحكم المباشر في دورة العمل (DSVPWM). تم إجراء تحليل مقارن متعمق بين خوارزميتين MPPT شائعتي الاستخدام: الموصلية المتزايدة (INC) وطريقة الاضطراب والمراقبة (P&O). وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها تفوق خوارزمية INC من حيث الاستقرار والسرعة في مواجهة التغيرات في أشعة الشمس ودرجة الحرارة.

في الجزء الثاني من الرسالة، نقترح طريقة تحسين مبتكرة لنظام ضخ الطاقة الشمسية الكهروضوئية ثنائي المرحل، القادر على التكيف مع الظروف المناخية المتغيرة، وخاصة في حالة التظليل الجزئي. تم إجراء النمذجة والمحاكاة في بيئة Matlab/Simulink. تكمن أصالة هذا الجزء في تقديم خوارزمية تحسين كسارة البندق (NOA) لأول مرة في التحكم في MPPT (تتبع نقطة الطاقة القصوى) لمحول CC-CC. تمت مقارنة أداء NOA بأداء خوارزمية تحسين سرب الجسيمات الفوقية (PSO). وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن NOA يسمح بتتبع أسرع وأكثر استقراراً لنقطة الطاقة القصوى، وبالتالي ضمان استغلال أفضل للطاقة الشمسية في ظل الظروف الجوية المختلفة.

أخيراً، تم تنفيذ استراتيجية تحكم تعتمد على التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC)، المرتبطة بالتحكم في السرعة، للتحكم في المحرك غير المتزامن الذي يحرك المضخة. يهدف هذا النهج إلى تعظيم كفاءة الطاقة الإجمالية للنظام مع ضمان إمدادات المياه الموثوقة في المناطق الريفية غير المتصلة بشبكة الكهرباء.

كلمات مفتاحية: الطاقة الشمسية الكهروضوئية، عاكس مصدر شبه، تعديل عرض النبضة المتجهة المتحكم بها مباشرة، تتبع نقطة القدرة القصوى، الموصلية المتزايدة، الاضطراب والمراقبة، خوارزمية تحسين كسارة البندق، تحسين سرب الجسيمات، التحكم المباشر في عزم الدوران.

# « Conception, optimisation, gestion d'énergie d'un système décentralisé de pompage/ dessalement / climatisation alimenté par des sources renouvelables »

## Résumé :

Les systèmes énergétiques, en particulier ceux reposant sur des sources renouvelables, présentent des performances fortement conditionnées par leur rendement global, lequel dépend de l'efficacité des différentes étapes de conversion d'énergie. Parmi les sources renouvelables les plus prometteuses figure l'énergie solaire, notamment dans les régions à fort ensoleillement, en raison de son abondance et de sa disponibilité. Cependant, les systèmes photovoltaïques présentent souvent un rendement limité, principalement à cause de l'intermittence de l'ensoleillement et des pertes liées à la conversion énergétique. Dans ce contexte, le pompage solaire photovoltaïque se révèle être une solution particulièrement adaptée aux zones rurales isolées. En réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et en diminuant les coûts d'exploitation, il permet de répondre aux besoins en eau pour l'irrigation et l'usage domestique. Cette thèse porte sur l'étude et l'optimisation de deux systèmes autonomes alimentés par une source d'énergie solaire. La première partie s'intéresse à un système à un seul étage basé sur un onduleur de type quasi-Z-Source (qZSI), dans lequel une nouvelle méthode de commande est implémentée, fondée sur le contrôle direct du cycle de service (DSVPWM). Une analyse comparative approfondie est menée entre deux algorithmes MPPT couramment utilisés : la conductance incrémentale (INC) et la méthode de perturbation et observation (P&O). Les résultats obtenus montrent une supériorité de l'algorithme INC en termes de stabilité et de rapidité face aux variations d'ensoleillement et de température.

Dans la deuxième partie de la thèse, nous proposons une méthode d'optimisation innovante pour un système de pompage photovoltaïque à deux étages, capable de s'adapter aux conditions climatiques changeantes, notamment en cas d'ombrage partiel. La modélisation et la simulation ont été réalisées dans l'environnement Matlab/Simulink. L'originalité de cette partie réside dans l'introduction, pour la première fois, de l'algorithme d'optimisation de Casse-Noisette (NOA) dans la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) d'un convertisseur CC-CC. Les performances du NOA ont été comparées à celles de l'algorithme métaheuristique d'optimisation par essaim de particules (PSO). Les résultats obtenus montrent que le NOA permet un suivi plus rapide et plus stable du point de puissance maximale, assurant ainsi une meilleure exploitation de l'énergie solaire sous diverses conditions météorologiques.

Enfin, une stratégie de commande basée sur le contrôle direct du couple (DTC), associée à un asservissement de la vitesse, est mise en œuvre pour piloter un moteur asynchrone entraînant la pompe. Cette approche vise à maximiser l'efficacité énergétique globale du système tout en assurant un approvisionnement fiable en eau dans les zones rurales non connectées au réseau électrique.

**Mots clés :** Photovoltaïque, onduleur quasi-Z-Source (qZSI), modulation de largeur d'impulsion vectorielle à contrôle direct (DSVPWM), suivi du point de puissance maximale (MPPT), conductance incrémentale (INC), perturbation et observation (P&O), algorithme d'optimisation de Casse-Noisette (NOA), optimisation par essaim de particules (PSO), contrôle direct du couple (DTC).

## **« Design, optimization and energy management of a decentralized pumping/desalination/air-conditioning system powered by renewable sources »**

### **Abstract :**

Energy systems, particularly those based on renewable sources, have performances that are strongly conditioned by their overall efficiency, which depends on the efficiency of the different energy conversion stages. Among the most promising renewable sources is solar energy, particularly in regions with high sunshine, due to its abundance and availability. However, photovoltaic systems often have limited efficiency, mainly due to the intermittency of sunshine and losses related to energy conversion. In this context, photovoltaic solar pumping proves to be a particularly suitable solution for isolated rural areas. By reducing dependence on fossil fuels and lowering operating costs, it can meet water needs for irrigation and domestic use. This thesis focuses on the study and optimization of two autonomous systems powered by a solar energy source. The first part focuses on a single-stage system based on a quasi-Z-Source (qZSI) inverter, in which a novel control method is implemented, based on direct duty cycle control (DSVPWM). An in-depth comparative analysis is conducted between two commonly used MPPT algorithms: incremental conductance (INC) and the perturb and observe (P&O) method. The results obtained demonstrate the superiority of the INC algorithm in terms of stability and speed in the face of variations in sunlight and temperature.

In the second part of the thesis, we propose an innovative optimization method for a two-stage photovoltaic pumping system capable of adapting to changing climatic conditions, particularly in the case of partial shading. Modeling and simulation were carried out in the Matlab/Simulink environment. The originality of this section lies in the introduction, for the first time, of the Nutcracker Optimization Algorithm (NOA) in the Maximum Power Point Tracking (MPPT) control of a DC-DC converter. The performance of NOA was compared with that of the metaheuristic particle swarm optimization (PSO) algorithm. The results show that NOA enables faster and more stable tracking of the maximum power point, thus ensuring better exploitation of solar energy under various weather conditions.

Finally, a control strategy based on direct torque control (DTC), combined with speed control, is implemented to drive an asynchronous motor driving the pump. This approach aims to maximize the overall energy efficiency of the system while ensuring a reliable water supply in rural areas not connected to the electricity grid.

**Key words:** Photovoltaic, quasi-Z-Source inverter (qZSI), Direct control space vector pulse width modulation (DSVPWM), Maximum Power Point Tracking (MPPT), Incremental Conductance (INC),

Perturbation and Observation (P&O), Nutcracker Optimization Algorithm (NOA), particle swarm optimization (PSO), direct torque control (DTC)

## **Dédicace :**

**Je dédie cette Thèse à tous les membres de ma famille**

**À mon très cher père, Monsieur RAHLI Bachir :**

**Aucun mot ne saurait exprimer pleinement l'amour profond et la reconnaissance que je vous porte. Je suis conscient de tout ce que vous avez enduré pour notre bien-être, et je mesure chaque jour la chance que j'ai de vous avoir pour père. Je vous fais la promesse que vos efforts et vos sacrifices ne seront jamais vains.**

**À ma précieuse mère :**

**Recevez toute mon affection et mon amour les plus sincères. Votre tendresse, votre patience et vos prières ont été une source inestimable de force et de réconfort tout au long de ce parcours.**

**À mes chères sœurs :**

**Merci pour ta présence, ton soutien discret et ton affection constante chaque jour.**

**À la mémoire de mon regretté ami BOUAKKAZ Mohamed Saleh :**

**Tu m'as apporté une aide précieuse durant la réalisation de ce travail. Que Dieu t'accorde Sa paix éternelle et t'accueille dans Sa sainte miséricorde.**

## **Remerciements :**

**Merci à Allah avant tout.**

**Merci à mes parents et les membres de ma famille pour leur soutien et leur patience.**

**Je tiens à remercier très sincèrement Dr OUADA Mehdi et le Pr SAAD Salah pour leurs conseils et leur soutien dans mon travail de recherche.**

**Merci aux Pr. CHEGHIB Hocine, Dr. BENAMIRA Nadir DR.TALBI Nabil, DR. DJELLAD Abdelhak et à Dr DEKHANE Azzeddine d'avoir accepté de faire partie du comité d'examen scientifique.**

**Merci à Issam Attoui, Mohamed Saleh Bouakkaz, Ahmed Bouraoui, Abderrahim Dardar pour leur soutien et leur encouragement.**

**Remerciements aux membres d'Unité de Recherche en Matériaux Avancés (URMA/CRTI) - Annaba-Algérie**

## Liste des Abréviations

AC	Courant alternative
ANN	Réseaux de neurones artificiels
AOS	La recherche orbitale atomique
B	Facteur d'amplification.
BLDC	Moteur courant continue sans balais
CC	Courant continu
CDI	La déionisation capacitive
CGFSSO	Optimisation par essaimage basé sur un facteur de guidage coopératif
CSI	Onduleur à source de courant
D	Le rapport cyclique
DA	L'algorithme de la libellule
DC	Courant continu
DM	Distillation membranaire
DSVPWM	Directe modulation de largeur d'impulsion par le vecteur spatial
DTC	Contrôle direct du couple
ED	L'électrodialyse
EMS	Systèmes de management d'énergie
EOA	L'optimisation par tremblements de terre
ER	Energie renouvelables
EVA	Ethylène-acétate de vinyle
FLC	Contrôle par logique floue
FOCV	La méthode de tension en circuit ouvert fractionnaire
GA	L'algorithme génétique
GHI	L'irradiation horizontale globale
GHO	L'optimisation de la trémie
GMPP	Point de puissance maximale global
GOA	L'algorithme d'optimisation de la sauterelle
GPV	Générateur photovoltaïque
GWO	L'optimiseur du loup gris
HC	La montée de colline
IA	Intelligence Artificielle
IC	Incrémentale conductance

IFFO	L'optimisation améliorée de la fertilité des terres agricoles
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée
IoT	L'Internet des objets
ITSO	Algorithme d'optimisation d'essaims de thons amélioré
I-V	Intensité-tension
LMPP	Points de puissance maximale locaux
MAE	Erreur absolue moyenne
MAS	Moteur asynchrone triphasé
MBC	Commande de suralimentation maximale
MCA	L'algorithme des chaises musicales
MCBC	Commande de suralimentation maximale constante
MCP	Les matériaux à changement de phase
MFOA	L'algorithme d'optimisation de la flamme de la mite
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MPP	Point de puissance maximale
MPPT	Suivi du point de puissance maximale
MVPA	L'algorithme du joueur le plus précieux
N	Négative
NOA	L'algorithme d'optimisation du Casse-Noisette
NPC	Onduleur à point neutre bloqué
OBEO	Optimiseur à équilibre basé sur l'opposition
OI	Osmose inverse
P	Positive
P&O	Perturbation & observation
PACG	Les pompes à chaleur géothermiques
P-I	Puissance-courant
Pmax	La puissance maximale
PMSM	Moteur synchrone à aimants permanents
PSC	Condition d'ombrage partiel
PSO	Optimisation de l'essaim de particules
PV	Photovoltaïque
P-V	Puissance-tension
PVWPS	Système pompage d'eau photovoltaïque
Qzsi	Onduleur quasi-Z-source
SBC	Commande de suralimentation simple

SD	Écart-type
SRA	L'algorithme de recherche et sauvetage
ST	Court-circuit contrôlé
STC	Conditions d'essai standard
SVPWM	Modulation de largeur d'impulsion par le vecteur spatial
USD	Dollar américain
UV	Ultra-violet
VFD	Variateurs de fréquence
VSI	L'onduleur à source de tension
ZSI	Onduleurs Z-source

## Constantes physiques

Charge d'électron  $q = 1.60217662 \times 10^{-19} \text{ C}$

Constante de Boltzmann  $k = 1.38064852 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

Irradiation STC  $G = 1000 \text{ W/m}^2$

Température STC  $T = 25^\circ$

## Liste des symboles :

$V_i$	La tension d'entrée du convertisseur élévateur
$k_p^{dc}$	Gain proportionnel du régulateur de tension continue
$k_i^{dc}$	Gain intégral du régulateur de tension continue
$k_p^l$	Gain proportionnel du régulateur de l'inductance
$\vec{D}_{max}$	Limite supérieure du problème
$\vec{D}_{min}$	Limite inférieure du problème
$K_{pump}$	La constante de proportionnalité de la pompe centrifuge
$T_{pump}$	Le couple de charge de la pompe
$D_{best}(K)$	La position ou le cache optimal,
A, C et B	Indices distincts
c1-c3	Nombres réels aléatoire
$C_{dc}$	Capacité de sortie du convertisseur élévateur
$C_i$	La capacité du convertisseur élévateur
$D_i^{(nouveau)}(K+1)$	La nouvelle position de stockage Casse-Noisette
$f_s$	La fréquence de commutation du convertisseur élévateur
G	L'irradiation actuelle
$G_1$	Le gain de tension
$G_n$	L'irradiation nominale
I	L'indice de population,
$I_d$	Le courant de sortie du générateur photovoltaïque
$I_{mp}$	Courant à Pmax
$I_o$	Représente le courant qui s'oppose à la saturation.
$I_{ph}$	Photo courant.
$I_{ph,n}$	Le courant nominal généré
$I_{pv}$	Courant de sortie du générateur PV
$I_s$	Courant mutuel
$I_{sc}$	Courant de court-circuit
$I_{sh}$	Courant dans la branche parallèle
K	L'indice d'itération
$K_I$	Coefficient de courant de court-circuit/température

$L$	L'inductance du convertisseur élévateur
$M$	L'indice de modulation,
$N_{ss}$	Nombre de panneaux connectés en série
$P_{a1}, P_{a2}$	Valeur de probabilité
$P_{pv}$	Puissance de sortie du générateur PV
$PR$	Point de référence
$RM$	Vecteur aléatoire
$R_p$	La résistance parallèle
$R_s$	Résistance série du panneau PV
$T$	Température actuelle
$T_n$	Température nominale
$T_{nsh}$	L'intervalle de temps qui n'est pas dans l'état ST
$T_{sh}$	La période de temps qui est dans l'état ST
$V_{c1}$	La tension moyenne entre le condensateur 1
$V_{c2}$	La tension moyenne entre le condensateur 2
$V_{dc}$	La tension d'entrée du convertisseur
$V_{dc^*}$	La tension de sortie du convertisseur élévateur
$V_{in}$	Tension aux bornes du circuit intermédiaire du pont onduleur
$V_{mp}$	Tension à Pmax
$V_{oc}$	Tension en circuit ouvert
$V_{ph}$	La phase de crête de sortie
$V_{pv}$	Tension de sortie du générateur PV
$V_t$	La tension thermique du générateur PV
$A$	Convergence constante du NOA
$\delta_l - \delta_g$	Nombres réels aléatoire
$\Delta i_L$	Le courant d'ondulation de l'inductance du convertisseur élévateur
$\Delta v_{dc}$	Facteur d'ondulation de la tension du convertisseur élévateur
$\Delta v_{mp}$	Facteur d'ondulation de la tension au point de puissance maximale
$\Omega$	La vitesse du moteur
$D_{best}(K)$	La dimension de la meilleure solution
$D_i(K)$	Position actuelle du $i^{\text{ème}}$ casse-noisette
$D_i(K+1)$	La nouvelle position du $i^{\text{ème}}$ casse-noisette
$D_m(K)$	La dimension moyenne de toutes les solutions de la population actuelle
$\varphi - \gamma$	Nombres réels aléatoire

## Liste des figures

<b>Figure I-1:</b> Évolution de la Production Électrique par Source d'Énergie en TWh (2022-2026) .....	7
<b>Figure I-2:</b> Chaîne de production et distribution d'énergie renouvelable .....	8
<b>Figure I-3:</b> Système a bus CC .....	10
<b>Figure I-4:</b> Système a bus AC .....	11
<b>Figure I-5:</b> Système a bus mixte CC/AC.....	12
<b>Figure I-6:</b> Système a gestion décentraliser .....	14
<b>Figure I-7:</b> Système de pompage alimenter par énergie solaire.....	19
<b>Figure I-8:</b> Classification des machines électriques pour systèmes de pompage a énergie solaire ...	22
<b>Figure I-9:</b> Système de climatisation alimenter par énergie solaire .....	23
<b>Figure I-10:</b> Système de dessalement alimenter par énergie solaire .....	26
<b>Figure II-1:</b> Investissement annuel mondial dans l'énergie solaire photovoltaïque et d'autres technologies de production 2021-2024 [66].....	32
<b>Figure II-2:</b> Potentiel d'énergie photovoltaïque[69] .....	33
<b>Figure II-3:</b> Irradiation horizontale globale-Algérie [70] .....	34
<b>Figure II-4:</b> Étapes de fabrication et d'installation d'un panneau photovoltaïque.....	37
<b>Figure II-5 :</b> Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	39
<b>Figure II-6 :</b> Courbe caractéristique du courant en fonction de la tension avec différentes températures (a) et (b) avec différentes irradiations .....	41
<b>Figure II-7 :</b> Courbe caractéristique de la puissance avec différentes températures (a) et (b) courbe de la puissance avec irradiations variables.....	41
<b>Figure II-8 :</b> Courbe caractéristique de la puissance avec PSC (a) et (b) courbe de courant en PSC .....	41
<b>Figure II-9 :</b> Classification du système PV .....	42
<b>Figure II-10 :</b> Système photovoltaïque autonome .....	42
<b>Figure II-11 :</b> Système photovoltaïque connecté au réseau .....	43
<b>Figure II-12 :</b> Systèmes photovoltaïque hybrides .....	44
<b>Figure II-13 :</b> MPPT Classification .....	45
<b>Figure II-14:</b> Organigramme de la méthode P&O.....	47
<b>Figure II-15:</b> Organigramme de la méthode INC .....	48
<b>Figure II-16:</b> FLC structure.....	49
<b>Figure II-17:</b> ANN structure .....	50
<b>Figure II-18:</b> PSO structure .....	51
<b>Figure III-1:</b> Modèle Simulink de cellule PV .....	55
<b>Figure III-2:</b> Le circuit équivalent qZSI dans la condition ST (a) et le circuit équivalent qZSI dans la condition non ST (b) .....	57
<b>Figure III-3:</b> Schéma du système étudié .....	58
<b>Figure III-4:</b> Séquence de commutation pour DSVPWM dans le secteur 1 .....	59
<b>Figure III-5:</b> Divers exemples d'irradiation solaire .....	60
<b>Figure III-6:</b> Évaluation de la puissance de sortie en comparant les algorithmes INC et P&O dans des conditions de variations d'irradiation .....	61
<b>Figure III-7:</b> Diverses instances de température.....	61
<b>Figure III-8:</b> Évaluation de la puissance de sortie en comparant les algorithmes INC et P&O dans des conditions de variations de température.....	62
<b>Figure III-9:</b> Deuxième scénario de variation de l'irradiation .....	63
<b>Figure III-10:</b> Réponse de l'algorithme INC-P&O à un changement rapide d'irradiance. ....	63
<b>Figure IV-1:</b> Système générale .....	66
<b>Figure IV-2:</b> Convertisseur élévateur .....	68
<b>Figure IV-3:</b> Structure globale du PVWPS étudié avec les contrôleurs proposés.....	69

<b>Figure IV-4:</b> Organigramme de l'algorithme proposé avec les équations mathématiques.....	79
<b>Figure IV-5:</b> Caractéristiques P-V et I-V dans les conditions d'ombrage partiel du cas 1.....	83
<b>Figure IV-6:</b> Caractéristiques P-V et I-V dans les conditions d'ombrage partiel du cas 2.....	83
<b>Figure IV-7:</b> Caractéristiques P-V et I-V dans les conditions d'ombrage partiel du cas 3.....	83
<b>Figure IV-8:</b> Caractéristiques P-V et I-V dans les conditions d'ombrage partiel du cas 4.....	84
<b>Figure IV-9:</b> Puissance photovoltaïque pour le cas 1.....	85
<b>Figure IV-10:</b> Puissance photovoltaïque pour le cas 2.....	85
<b>Figure IV-11:</b> Puissance photovoltaïque pour le cas 3.....	85
<b>Figure IV-12:</b> Puissance photovoltaïque pour le cas 4.....	86
<b>Figure IV-13:</b> V <sub>dc</sub> et V <sub>pv</sub> dans un cas variable avec PSO.....	86
<b>Figure IV-14:</b> V <sub>dc</sub> et V <sub>pv</sub> dans un cas variable avec NOA.....	87
<b>Figure IV-15:</b> Couple et vitesse du rotor pour le cas 1.....	87
<b>Figure IV-16:</b> Couple et vitesse du rotor pour le cas 2.....	88
<b>Figure IV-17:</b> Couple et vitesse du rotor pour le cas 3.....	88
<b>Figure IV-18:</b> Couple et vitesse du rotor pour le cas 4.....	89
<b>Figure IV-19:</b> Débit et flux d'eau dans le cas variable avec NOA.....	89
<b>Figure IV-20:</b> Débit et flux d'eau dans le cas variable avec PSO.....	90

## Liste des tableaux

<b>Tableau III-1:</b> Paramètres électriques du module PV KYOCERA KC200GT .....	60
<b>Tableau III-2:</b> Simulation paramètres.....	60
<b>Tableau IV-1:</b> Paramètres électriques du module PV China synergy (Nanjing) SST230-60P .....	67
<b>Tableau IV-2:</b> Valeurs des paramètres du convertisseur élévateur .....	69
<b>Tableau IV-3:</b> Paramètres du MAS.....	70
<b>Tableau IV-4:</b> Configuration et paramètres de simulation .....	80
<b>Tableau IV-5:</b> Paramètres du système proposé .....	81
<b>Tableau IV-6:</b> Paramètres utilisés pour l'algorithme PSO.....	81
<b>Tableau IV-7:</b> Conditions d'ombrage partiel .....	82
<b>Tableau IV-8:</b> Mesure et analyse statistique des performances des algorithmes NOA et PSO .....	92

## Table des matieres

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I: Systèmes multi sources et multi charges</b> .....	<b>6</b>
<b>I.1 Introduction</b> .....	<b>6</b>
<b>I.2 Principaux Défis Techniques pour Connecter les Régions Isolées au Réseau Électrique</b> .....	<b>7</b>
<b>I.3 Classification des systèmes multi-sources :</b> .....	<b>7</b>
<b>I.3.1 Classification selon les sources d'énergie</b> .....	<b>8</b>
I.3.1.1 Systèmes PV-Éolien .....	8
I.3.1.2 Systèmes PV-Diesel.....	8
I.3.1.3 Systèmes PV-Stockage (Batteries).....	9
I.3.1.4 Systèmes PV-Éolien-Diesel .....	9
I.3.1.5 Systèmes PV-Éolien-Stockage .....	9
I.3.1.6 Systèmes PV-Éolien-Diesel-Stockage .....	9
<b>I.3.2 Classification selon Architectures et topologies</b> .....	<b>10</b>
• Systèmes à bus CC (Courant continu) .....	10
• Systèmes à bus AC (Courant alternatif) .....	10
• Système mixte à bus CC/AC .....	11
<b>I.3.3 Classification selon l'architecture de gestion</b> .....	<b>13</b>
I.3.3.1 Systèmes à gestion centralisée .....	13
I.3.3.2 Systèmes à gestion distribuée .....	13
I.3.3.3 Systèmes à gestion décentralisée.....	13
<b>I.3.4 Classification selon mode de fonctionnement</b> .....	<b>14</b>
I.3.4.1 Systèmes autonomes .....	14
I.3.4.2 Systèmes connectés au réseau.....	14
I.3.4.3 Systèmes hybrides.....	15
<b>I.3.5 Classification selon l'application</b> .....	<b>15</b>
I.3.5.1 Applications industrielles .....	15
I.3.5.2 Applications résidentielles.....	15
I.3.5.3 Applications mobiles et transports.....	15
<b>I.3.6 Classification des systèmes selon leur logique de contrôle</b> .....	<b>16</b>
I.3.6.1 Contrôle prédictif .....	16

I.3.6.2	Contrôle adaptatif.....	17
I.3.6.3	Contrôle optimal.....	17
I.3.6.4	Contrôle intelligent (IA, apprentissage automatique) .....	17
I.3.6.5	Contrôle par logique floue.....	18
<b>I.4</b>	<b>Les système multi charge électromécanique .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.1</b>	<b>Pompage.....</b>	<b>18</b>
I.4.1.1	Sources d'énergie renouvelables pour le pompage de l'eau.....	19
I.4.1.2	Technologies de pompage .....	20
I.4.1.3	Machines électriques pour systèmes de pompage à énergie solaire.....	21
<b>I.4.2</b>	<b>Climatisation .....</b>	<b>22</b>
I.4.2.1	Sources d'énergie renouvelables pour la climatisation .....	23
I.4.2.2	Technologies avancées de climatisation .....	24
<b>I.4.3</b>	<b>Dessalement.....</b>	<b>25</b>
I.4.3.1	Sources d'énergie renouvelables pour le dessalement .....	26
I.4.3.2	Technologies avancées de dessalement.....	27
<b>I.4.4</b>	<b>Stockage d'énergie .....</b>	<b>27</b>
<b>I.4.5</b>	<b>Systèmes de contrôle et de surveillance intelligents .....</b>	<b>28</b>
<b>I.4.6</b>	<b>Défis et Perspectives des Énergies Renouvelables pour le Pompage, la Climatisation et le Dessalement .....</b>	<b>28</b>
<b>I.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>29</b>
 <b>CHAPITRE II Systèmes photovoltaïques, technologies et optimisation     31</b>		
<b>II.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>31</b>
<b>II.2</b>	<b>Contexte et évolution du photovoltaïque .....</b>	<b>31</b>
II.2.1	Le développement du marché mondial de l'énergie photovoltaïque ....	31
II.2.2	Historique et évolution des technologies photovoltaïques .....	32
<b>II.3</b>	<b>Principes fondamentaux du photovoltaïque.....</b>	<b>35</b>
II.3.1	L'effet photovoltaïque .....	35
II.3.2	Le rayonnement solaire.....	35
II.3.3	Impact des conditions environnementales.....	36
<b>II.4</b>	<b>Composants des systèmes photovoltaïques.....</b>	<b>36</b>
<b>II.4.1</b>	<b>Les cellules photovoltaïques.....</b>	<b>37</b>
II.4.1.1	Types des cellules .....	37
II.4.1.2	Matériaux semi-conducteurs .....	38

II.4.1.3	Assemblage et fonctionnement .....	38
<b>II.4.2</b>	<b>Les modules photovoltaïques .....</b>	<b>39</b>
II.4.2.1	Structure .....	39
II.4.2.2	Fonctionnement.....	40
II.4.2.3	Caractéristiques électriques.....	40
<b>II.5</b>	<b>Classification et architecture des systèmes photovoltaïques .....</b>	<b>42</b>
II.5.1	Systèmes autonomes .....	42
II.5.2	Systèmes connectés au réseau .....	43
II.5.3	Systèmes hybrides.....	43
<b>II.6</b>	<b>Applications des systèmes photovoltaïques .....</b>	<b>44</b>
II.6.1	Applications résidentielles .....	44
II.6.2	Applications commerciales et industrielles .....	44
II.6.3	Systèmes isolés.....	44
II.6.4	Intégration dans les réseaux électriques.....	44
<b>II.7</b>	<b>Techniques d'optimisation du point de puissance maximale (MPPT)</b>	<b>45</b>
II.7.1	Algorithmes MPPT conventionnels .....	46
II.7.1.1	Technique Perturbation & Observation (P&O) .....	46
II.7.1.2	Conductance incrémentale (IC).....	47
II.7.2	Techniques MPPT basées sur l'intelligence artificielle (IA).....	48
II.7.2.1	Contrôle par logique floue (FLC).....	48
II.7.2.2	Réseaux de neurones artificiels (ANN).....	49
II.7.3	Techniques MPPT métaheuristique .....	50
II.7.3.1	Optimisation par essais de particules (PSO).....	50
II.7.3.2	NOA optimisation algorithme .....	51
<b>II.8</b>	<b>Dimensionnement et optimisation des systèmes photovoltaïques....</b>	<b>52</b>
<b>II.9</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>52</b>
<b>CHAPITRE III Optimisation d'adaptateur de charge pour système</b>		
<b>PV            54</b>		
<b>III.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>54</b>
<b>III.2</b>	<b>Modélisation d'un GPV .....</b>	<b>55</b>
<b>III.3</b>	<b>Fonctionnement du qZSI.....</b>	<b>56</b>
<b>III.4</b>	<b>Méthode proposée pour la commande.....</b>	<b>58</b>

<b>III.5</b>	<b>Commande du rapport cyclique .....</b>	<b>58</b>
<b>III.6</b>	<b>Résultats et discussion .....</b>	<b>59</b>
<b>III.7</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>64</b>
	<b>CHAPITRE IV Optimisation de système de pompage photovoltaïque par NOA MPPT .....</b>	<b>65</b>
<b>IV.1</b>	<b>Introduction :.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.2</b>	<b>Méthode.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.2.1</b>	<b>System description .....</b>	<b>66</b>
<b>IV.2.2</b>	<b>CC/CC Convertisseur .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.2.3</b>	<b>Stratégie de contrôle du système proposé.....</b>	<b>69</b>
<b>IV.2.4</b>	<b>Algorithme NOA .....</b>	<b>71</b>
<b>IV.3</b>	<b>Résultats et interprétation.....</b>	<b>79</b>
<b>IV.4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>93</b>
	<b>Conclusion générale : .....</b>	<b>94</b>

### Introduction générale :

La transition énergétique mondiale s'oriente de plus en plus vers l'adoption des énergies renouvelables (ER), notamment l'énergie solaire photovoltaïque (PV), reconnue pour sa disponibilité [1], sa propreté et sa flexibilité. Cette technologie est particulièrement prometteuse pour les régions à fort ensoleillement, comme l'Algérie [2] où elle peut répondre efficacement aux besoins énergétiques locaux tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles [3]. Dans ce contexte, les systèmes de pompage se distinguent par leur faible demande énergétique, leur simplicité de conception et leur compatibilité naturelle avec les énergies renouvelables. Leur utilisation est particulièrement indiquée pour des applications telles que l'irrigation ou l'approvisionnement en eau dans des régions reculées [4].

La représentation et la modélisation des systèmes photovoltaïques jouent un rôle essentiel dans la compréhension, l'optimisation et l'exploitation efficace de l'énergie solaire. Les variations météorologiques, qui influencent à la fois l'irradiation et la température, ont un impact déterminant sur les performances de ces systèmes [5]. Il est donc crucial de maximiser l'exploitation de la puissance disponible dans des conditions variables, à l'aide d'algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT), tels que Perturbation et Observe ou Incrémentale Conductance et (PSO) [6], optimisation par essaimage basé sur un facteur de guidage coopératif (CGFSSO) [7], l'algorithme de la libellule (DA), l'algorithme d'optimisation de la flamme de la mite (MFOA), l'algorithme d'optimisation de la sauterelle (GOA) [8]. L'équilibre entre le stockage, l'électronique de puissance et les systèmes de commande intelligents constitue une combinaison gagnante pour accroître l'efficacité et la fiabilité des installations [9].

Par ailleurs, le choix de l'architecture de conversion d'énergie est un facteur déterminant dans la performance globale des systèmes PV, en particulier dans les systèmes connectés à des charges comme les pompes. Les chercheurs ont noté que l'onduleur à source de tension (VSI) conventionnel ne peut pas prendre en charge l'activation simultanée des interrupteurs supérieurs et inférieurs, ce qui limite la tension de sortie AC à ne pas dépasser la tension d'entrée CC, nécessitant ainsi un convertisseur élévateur supplémentaire avant le circuit de l'onduleur [10]. Pour remédier à cette limitation, dans [11] le chercheur a développé un convertisseur de puissance à un étage, appelé onduleur à source Z (ZSI), capable d'effectuer des opérations d'amplification et d'inversion pour gérer une large gamme de tensions d'entrée. En outre, le ZSI peut fonctionner de manière fiable avec une large gamme de tensions d'entrée

## Introduction générale

continues générées par des sources photovoltaïques. Les ZSI sont donc largement utilisés dans les systèmes de production distribués et les applications pour véhicules électriques [12]. En outre, un onduleur à source quasi-Z alimenté en tension (qZSI) proposé dans [13]. Parmi les différentes topologies d'onduleurs, le qZSI est apparu comme un candidat prometteur en raison de sa capacité unique à surmonter les limites des onduleurs traditionnels, telles que le gain de tension limité et la nécessité de composants supplémentaires pour gérer efficacement les hausses et les baisses de tension. Le qZSI modifie un réseau ZSI, qui fournit une conversion d'énergie à un seul étage avec des capacités d'amplification et d'abaissement, améliorant ainsi la fiabilité et l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Cette topologie améliore la qualité de l'énergie et offre une plus grande immunité aux perturbations du réseau, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications connectées au réseau [14]. Les modes de fonctionnement du ZSI et du qZSI ont été étudiés dans la littérature. Dans [15], les auteurs ont discuté des différents modes de fonctionnement que le ZSI peut subir lorsqu'il est soumis à une faible inductance du réseau d'impédance ou à un faible facteur de puissance. Ils examinent également la valeur critique de l'inductance du réseau d'impédance nécessaire pour empêcher les modes de fonctionnement anormaux indésirables du ZSI. Les auteurs de [16] ont expliqué les modes de fonctionnement anormaux du qZSI, en introduisant la valeur critique de l'inductance du réseau d'impédance, essentielle pour garantir un fonctionnement correct. Le principal inconvénient du système qZSI est son manque d'isolation galvanique, qui entraîne des courants de fuite. Des recherches récentes visent à surmonter ce problème dans les VSI traditionnels en ajoutant des dispositifs de commutation supplémentaires ou en modifiant les techniques de modulation [17].

Pour repousser les limites de performance, de nouvelles stratégies de commande ont été proposées pour les onduleurs qZSI, combinant de manière novatrice la modulation de largeur d'impulsion vectorielle spatiale directe (DSVPWM) avec la modulation vectorielle spatiale classique (SVPWM) [18]. Cette méthode permet de générer directement le rapport cyclique tout en intégrant la fonction MPPT, éliminant ainsi la nécessité d'un régulateur PI conventionnel. Les résultats montrent que l'introduction de la DSVPWM dans le contrôle du qZSI favorise une conversion d'énergie plus dynamique et plus efficace, tout en améliorant la fiabilité globale du système.

Dans la littérature récente, de nombreuses approches modernes, qu'elles soient classiques ou issues de l'intelligence artificielle, ont été étudiées pour améliorer les techniques de suivi du

## Introduction générale

point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques [19]. Ces méthodes se déclinent en plusieurs catégories selon divers critères tels que le principe de suivi, les types de contrôleurs utilisés, la complexité matérielle et la simplicité d'implémentation. Les techniques conventionnelles basées sur le gradient, comme la perturbation et observation (P&O), la montée de colline (Hill Climbing, HC) et la conduite incrémentale (Incremental Conductance, IC) [20], bien qu'aisées à mettre en œuvre, présentent l'inconvénient de générer des oscillations autour du point de puissance maximale global (GMPP). De plus, leur incapacité à identifier plusieurs maxima dans des conditions d'ombrage partiel entraîne une perte significative de puissance [21]. En réponse à ces limitations, les techniques d'intelligence artificielle ont gagné en popularité dans les travaux de recherche récents sur le MPPT [22]. Durant la dernière décennie, plusieurs algorithmes stochastiques ont été appliqués au MPPT, avec des résultats prometteurs [23]. Les méthodes évolutionnaires, en particulier, se démarquent par leur aptitude à détecter efficacement le GMPP en présence d'ombres partielles. Parmi ces approches, on trouve l'algorithme de recherche et sauvetage (SRA) [24], l'optimisation par essaim de particules (PSO), l'algorithme du joueur le plus précieux (MVPA), l'optimisation par tremblements de terre (EOA) [25], l'optimiseur du loup gris (GWO)[26], l'optimisation de la trémie (GHO)[27], l'algorithme des chaises musicales (MCA)[28] et la recherche orbitale atomique (AOS) [29]. Ces algorithmes utilisent des populations ou des particules initialisées aléatoirement pour rechercher la position optimale, mais leurs performances restent fortement dépendantes des réglages des paramètres initiaux et de la qualité de la population de départ. Pour améliorer l'efficacité dans des situations d'ombrage, aussi bien uniforme que partiel, des approches hybrides ont vu le jour, telles qu'un algorithme combinatoire basé sur la logique floue (FLC) associé à l'optimisation améliorée de la fertilité des terres agricoles (IFFO)[30]. De même, une nouvelle technique métaheuristique, l'algorithme OBEO (Optimiseur à équilibre basé sur l'opposition), a été introduite dans [31]. Par ailleurs, une méthode hybride combinant l'algorithme génétique (GA) avec la méthode de tension en circuit ouvert fractionnaire (FOCV) a été proposée dans [32]. Enfin, une stratégie de contrôle MPPT en deux étapes, intégrant un algorithme d'optimisation d'essaims de thons amélioré (ITSO) couplé à une méthode adaptative de perturbation et observation (AP&O), a été développée pour accroître la robustesse du suivi. Ces avancées cherchent également à améliorer la diversité de la population initiale, facteur crucial dans les performances globales des métaheurstiques utilisées[33].

## Introduction générale

Au-delà de ces performances techniques, l'intégration d'algorithmes d'optimisation bio-inspirés, tels que l'algorithme d'optimisation du Casse-Noisette (NOA), dans le domaine des énergies renouvelables, présente des avantages considérables. En effet, L'algorithme d'optimisation du Casse-Noisette (NOA) proposé dans cette thèse est introduit pour la première fois dans le domaine du contrôle des systèmes solaires photovoltaïques. Ce nouvel algorithme, inspiré du comportement naturel du casse-noix [34], a été appliqué avec succès à l'optimisation des performances de la commande MPPT des systèmes solaires utilisés pour alimenter des systèmes de pompage. Les résultats obtenus confirment son efficacité face à la complexité non linéaire et aux multiples optima locaux causés par le phénomène d'ombrage partiel.

Cette étude met en lumière les implications importantes de l'utilisation de l'optimisation inspirée de la nature dans le domaine des énergies renouvelables, soulignant ainsi le potentiel révolutionnaire de cette approche pour améliorer la durabilité, l'efficacité et la résilience des systèmes critiques. Elle ouvre également la voie à des perspectives prometteuses pour étendre cette stratégie à d'autres structures et sources d'énergie alternatives, en proposant des solutions plus ingénieuses et plus flexibles.

### Structure de la thèse :

Cette thèse est structurée en plusieurs chapitres complémentaires, chacun abordant un aspect clé de l'intégration et de l'optimisation des systèmes énergétiques hybrides. Le **Chapitre 1** s'intéresse aux systèmes multi-sources, combinant l'énergie photovoltaïque, éolienne et diesel, ainsi qu'aux systèmes multi-charges, tels que le pompage, le dessalement et la climatisation, en mettant en évidence les défis liés à l'intégration, à la gestion énergétique et à la fiabilité, particulièrement dans le cadre de l'électrification rurale. Le **Chapitre 2** présente un état de l'art des technologies photovoltaïques actuelles, avec un accent particulier sur les méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et l'impact des conditions environnementales (irradiation, température, ombrage) sur les performances globales des systèmes PV. Le **Chapitre 3** propose une analyse détaillée de la topologie innovante du convertisseur **qZSI** (quasi-Z-source inverter), mettant en avant sa capacité à fournir une flexibilité en tension et une continuité du courant côté source ; ce chapitre explore également une nouvelle stratégie de commande basée sur la technique **DSVPWM**, visant à améliorer l'efficacité énergétique et la qualité de l'énergie délivrée. Le **Chapitre 4** introduit l'algorithme métaheuristique bio-inspiré **NOA** (Nature-Inspired Optimization Algorithm), appliqué à l'optimisation des performances des systèmes de pompage solaire, et en évalue l'efficacité en

## Introduction générale

conditions environnementales variables, démontrant sa supériorité en termes de rapidité de convergence et de précision du suivi du point de puissance maximale. Enfin, la **conclusion générale** synthétise l'ensemble des contributions de cette thèse et propose des perspectives de recherche future visant à renforcer la performance, l'intelligence et la durabilité des systèmes énergétiques hybrides dans des contextes d'application réels, notamment pour le développement des zones isolées

### CHAPITRE I: Systèmes multi sources et multi charges

#### I.1 Introduction

Selon les statistiques de l'Agence Internationale de l'Énergie, plus de trois quarts de l'énergie consommée dans le monde en 2024 provenait de sources fossiles[35]. Cependant, ces sources d'énergie gaz naturel, pétrole et charbon sont appelées à s'épuiser dans les décennies à venir. De plus, elles sont reconnues pour leur contribution à la pollution de l'air et à l'aggravation de l'effet de serre, qui entraîne le changement climatique. Face à la demande mondiale croissante, l'agence préconise le développement de sources d'énergie plus propres[36][37][38].

Pour la production d'électricité, des solutions alternatives incluent les sources photovoltaïques, éoliennes et hydrauliques. En outre, les réseaux de distribution ne parviennent souvent pas à fournir de l'électricité à l'ensemble de la population mondiale : que ce soit dans les régions montagneuses, sur des îles, dans des zones peu peuplées ou au milieu des déserts, des lieux difficiles ou très isolés ne peuvent pas toujours être raccordés au réseau en raison de problèmes techniques ou de viabilité économique[39]. Cependant, les sources d'énergie renouvelable peuvent être adaptées à un usage domestique, les rendant particulièrement appropriées pour la production d'électricité hors réseau ou les micro-réseaux. Elles sont souvent associées à des batteries, qui permettent le stockage d'énergie en cas de surplus de production ou pour compenser les déficits d'énergie à court terme lors des pics de consommation[40][41].

On observe une nette augmentation de la production totale, particulièrement marquée en 2026, avec une forte contribution des énergies renouvelables (en vert). Les autres sources, comme le charbon, le gaz, le nucléaire et les autres non renouvelables, restent présentes mais semblent relativement stables ou en faible croissance. Cette tendance indique une transition énergétique en faveur des énergies renouvelables au fil des années comme illustrer dans Figure I-1[42].

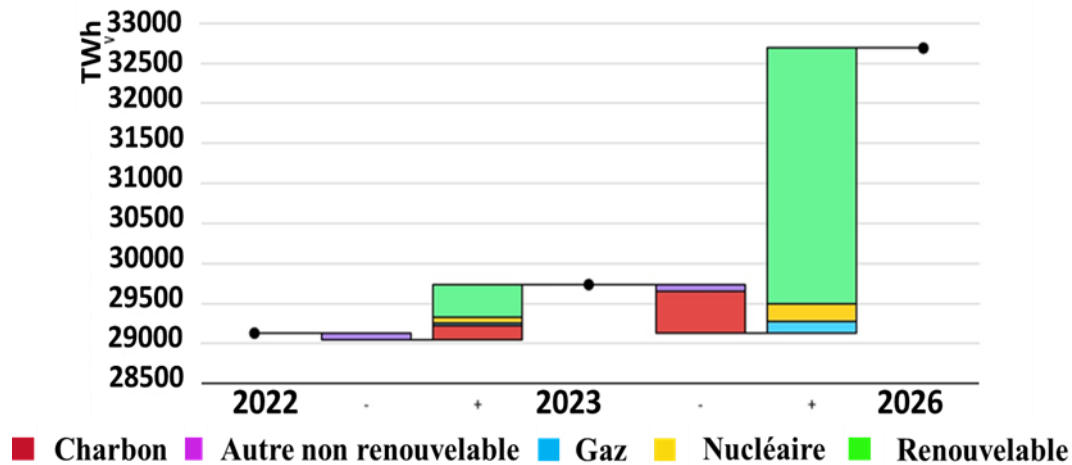


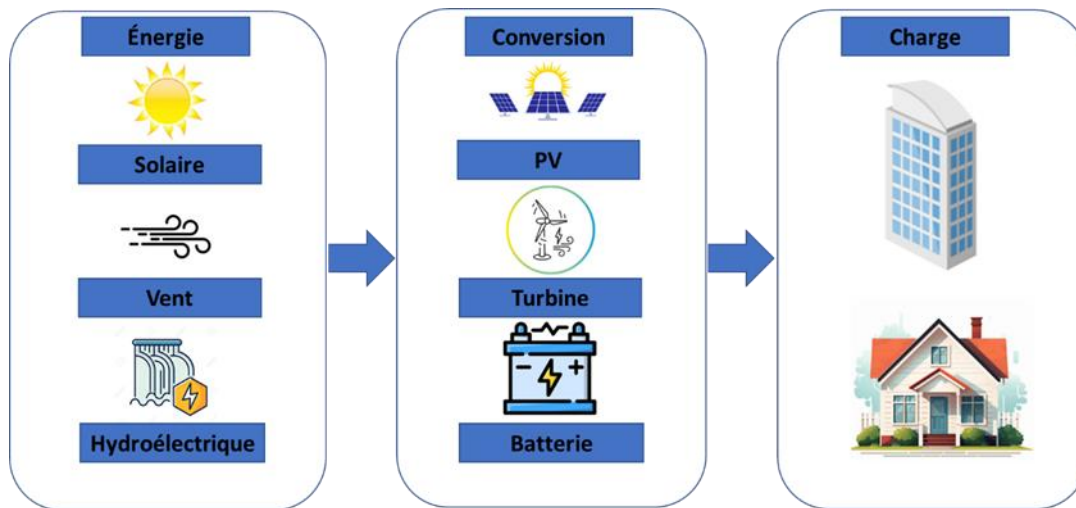
Figure I-1:Évolution de la Production Électrique par Source d'Énergie en TWh (2022-2026)

## I.2 Principaux Défis Techniques pour Connecter les Régions Isolées au Réseau Électrique

Plusieurs obstacles technologiques majeurs se dressent sur la voie du raccordement des régions périphériques au réseau électrique. Parmi eux, l'insuffisance des infrastructures constitue un problème majeur. Beaucoup de ces régions ne disposent pas encore de réseaux électriques, ce qui rend la construction de lignes de transmission et de sous-stations très coûteuse. C'est particulièrement vrai dans les régions montagneuses ou difficiles d'accès[43]. De plus, les investissements dans le câblage, les transformateurs et autres équipements ne sont souvent pas rentables par rapport à la consommation d'énergie en raison des coûts de connexion élevés, en particulier sur de longues distances. L'un des principaux obstacles est l'imprévisibilité des sources d'énergie renouvelables comme l'éolien et le solaire[44].

## I.3 Classification des systèmes multi-sources :

Les systèmes multi-sources se classent selon plusieurs critères les types d'énergie utilisés, le mode de connexion, l'architecture de gestion, le domaine d'application, et la stratégie de contrôle. Cette classification aide à choisir la configuration la plus adaptée selon les besoins et le contexte.



**Figure I-2:**Chaîne de production et distribution d'énergie renouvelable

## I.3.1 Classification selon les sources d'énergie

Voici une classification détaillée des systèmes multi-sources selon les sources d'énergie :

### I.3.1.1 Systèmes PV-Éolien

Les systèmes photovoltaïques et éoliens constituent une combinaison complémentaire et synergique de sources d'énergies renouvelables, leur caractère intermittent et leurs profils de production différents permettant une optimisation de la génération électrique et une meilleure stabilité du réseau. Parmi leurs caractéristiques, on note la complémentarité temporelle des productions, la réduction de la variabilité énergétique, la maximisation du taux de pénétration des énergies renouvelables (ER), un dimensionnement optimal et l'intégration de stratégies de stockage associées pour garantir une gestion efficace de l'énergie[45].

### I.3.1.2 Systèmes PV-Diesel

Ces systèmes hybrides associent des panneaux photovoltaïques à un groupe électrogène diesel, offrant une solution de production électrique résiliente pour les zones non interconnectées ou les sites isolés, avec le diesel assurant la production de secours et la stabilité du réseau. Parmi leurs caractéristiques, on note une réduction de la consommation de combustible, une continuité de service, une adaptation aux sites isolés, une flexibilité opérationnelle et l'intégration de stratégies de gestion intelligentes pour optimiser les performances du système.

### I.3.1.3 Systèmes PV-Stockage (Batteries)

L'association photovoltaïque et stockage batteries représente une solution avancée pour gérer l'intermittence de la production solaire, permettant de stocker l'énergie pendant les périodes de forte production et de la restituer lors des creux de production. Parmi ses caractéristiques, ce système offre un lissage de la production, une autonomie énergétique, une gestion efficace des pointes de consommation, l'utilisation de technologies de batteries variées, et une optimisation économique pour maximiser l'efficacité globale du système.

### I.3.1.4 Systèmes PV-Éolien-Diesel

Cette configuration complexe combine trois sources de production, offrant une approche multi-sources qui maximise la fiabilité et la flexibilité énergétique, avec le diesel assurant la production de secours et la stabilité du système. Parmi ses caractéristiques, on retrouve une haute résilience, une optimisation des coûts, une réduction des émissions, une gestion dynamique de l'énergie, et l'utilisation de stratégies de contrôle avancées pour garantir une performance optimale.

### I.3.1.5 Systèmes PV-Éolien-Stockage

Ce système intègre la production photovoltaïque, éolienne et le stockage, représentant une solution de référence pour les micro-réseaux et les installations autonomes, permettant une production continue et stable. Parmi ses caractéristiques, on note une très haute flexibilité, une production continue, une indépendance énergétique, l'utilisation de technologies de stockage évoluées et des algorithmes de gestion intelligents pour optimiser les flux d'énergie.

### I.3.1.6 Systèmes PV-Éolien-Diesel-Stockage

L'introduction présente la configuration ultime des systèmes multi-sources, combinant quatre technologies complémentaires pour offrir la solution la plus complète en termes de fiabilité, flexibilité et performance énergétique. Ce système se distingue par des caractéristiques telles que la fiabilité maximale, la redondance des sources, l'optimisation complexe, la gestion prédictive et l'intégration de technologies de pointe. Les axes transversaux incluent une gestion intelligente des flux, des systèmes de contrôle avancés, la réduction de l'empreinte carbone, l'optimisation économique et une résilience énergétique accrue. Les technologies habilitantes qui sous-tendent cette architecture sont l'électronique de puissance,

l'intelligence artificielle, les systèmes de management énergétique et les algorithmes prédictifs. Cette classification met en lumière la richesse et la sophistication croissante des architectures de systèmes multi-sources, illustrant l'évolution technologique vers des solutions énergétiques de plus en plus intégrées et intelligentes[46].

### I.3.2 Classification selon Architectures et topologies

La classification des systèmes multi-sources selon leurs architectures et topologies permet de distinguer trois configurations principales :

- **Systèmes à bus CC (Courant continu)**

Les systèmes à bus CC se caractérisent par une connexion centralisée sur un bus de courant continu (Figure I-3), offrant une approche simplifiée et efficace de la conversion énergétique. Ils sont particulièrement adaptés aux sources de type continu, telles que les panneaux solaires et les batteries. Parmi leurs caractéristiques principales, on trouve un bus de courant continu unique, une conversion minimale (CC/CC), des pertes de conversion réduites, une compatibilité idéale avec les sources CC, et l'utilisation d'une électronique de conversion spécialisée pour optimiser les performances du système[47].

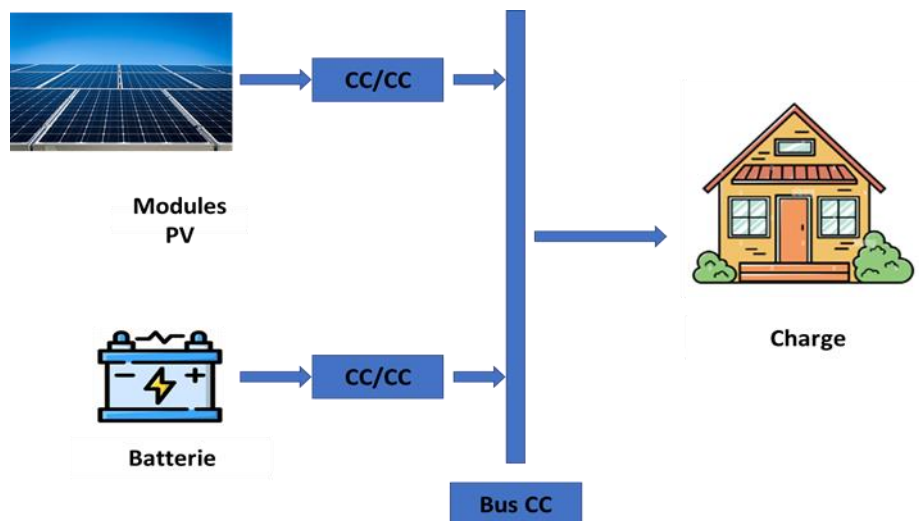
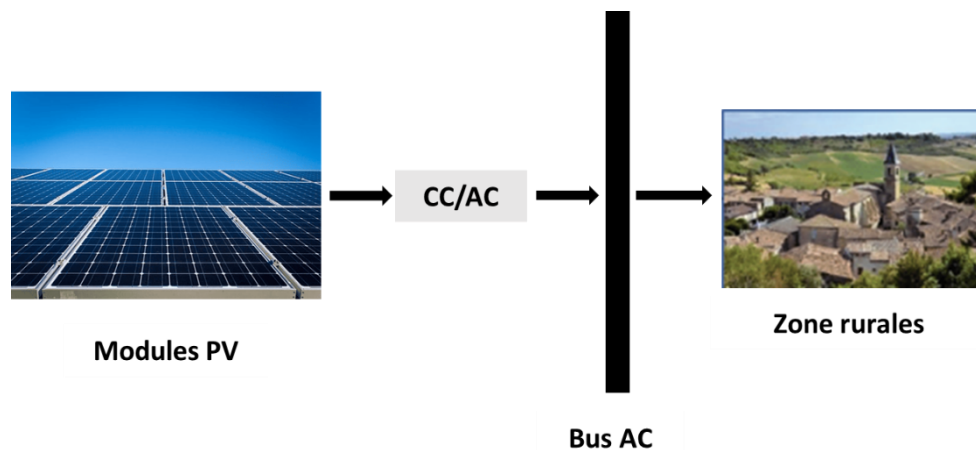


Figure I-3: Système à bus CC

- **Systèmes à bus AC (Courant alternatif)**

Les systèmes à bus AC utilisent un bus de courant alternatif comme point de convergence des différentes sources de production, et sont naturellement adaptés aux sources de grande

puissance, facilitant l'interface avec le réseau électrique traditionnel. Parmi leurs caractéristiques principales, on trouve une connexion via onduleurs individuels, une synchronisation sur le bus AC (Figure I-4), ainsi qu'une interface réseau facilitée, bien qu'ils nécessitent des onduleurs multifonctions pour gérer les différentes sources. Ces systèmes partagent également des points communs transversaux tels qu'un objectif d'optimisation énergétique, une gestion intelligente des flux, un contrôle et une synchronisation avancés, ainsi qu'une recherche de résilience du système. Les technologies habilitantes pour ces systèmes incluent l'électronique de puissance avancée, les systèmes de management d'énergie (EMS), des algorithmes de contrôle intelligents, ainsi que l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique pour améliorer l'efficacité et la performance du système[48].



**Figure I-4:** Système à bus AC

- **Système mixte à bus CC/AC**

La configuration à bus mixte CC/AC est une architecture innovante dans les systèmes d'énergie hybride, permettant de tirer parti des avantages des deux types de courant. Cette approche est particulièrement pertinente pour l'intégration de sources d'énergie renouvelable, telles que les systèmes photovoltaïques (PV) et éoliens, tout en assurant une gestion efficace de l'énergie. Dans un système à bus mixte, deux bus distincts sont utilisés : un bus à courant continu (CC) et un bus à courant alternatif (AC). Les sources d'énergie renouvelable, comme les panneaux solaires et les éoliennes, sont généralement connectées au bus CC, tandis que les charges et certains générateurs (comme les groupes électrogènes) se connectent au bus AC. L'interconnexion entre les deux bus est réalisée par des convertisseurs bidirectionnels (onduleurs/redresseurs), permettant la conversion de l'énergie entre CC et AC selon les besoins, et facilitant une gestion plus fine de l'énergie, optimisant ainsi la production et la consommation

en fonction de la disponibilité des ressources. Parmi les avantages de cette configuration, on note une meilleure efficacité énergétique, car la séparation des sources renouvelables (CC) des charges (AC) permet de fonctionner plus près de la puissance maximale de chaque source, une flexibilité accrue permettant l'utilisation simultanée de plusieurs sources d'énergie, ainsi qu'une réduction des pertes énergétiques dues à des conversions moins fréquentes entre AC et CC. Cependant, la configuration à bus mixte présente aussi des inconvénients, tels qu'une complexité accrue du système en raison de la gestion de deux types de bus, des coûts d'installation plus élevés en raison de l'intégration de convertisseurs bidirectionnels, et une dépendance aux convertisseurs, dont un dysfonctionnement pourrait affecter l'ensemble du système. Cette configuration trouve des applications pratiques dans les systèmes hybrides résidentiels et les installations industrielles, où elle permet une gestion locale efficace des ressources énergétiques renouvelables tout en maintenant une connexion au réseau électrique principal[49]. En conclusion, la configuration à bus mixte CC/AC est une solution efficace pour l'intégration des systèmes d'énergie hybride, offrant une optimisation de la production et de la gestion énergétique tout en répondant aux défis posés par l'intermittence des sources renouvelables.

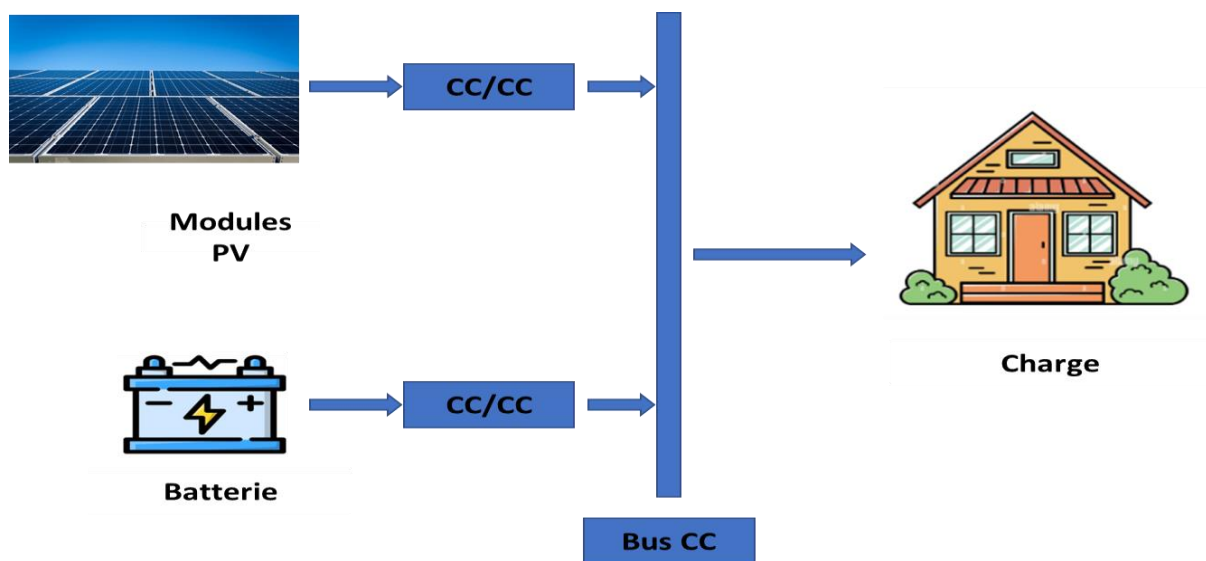


Figure I-5: Système à bus mixte CC/AC

### I.3.3 Classification selon l'architecture de gestion

#### I.3.3.1 Systèmes à gestion centralisée

L'architecture centralisée repose sur un système de contrôle unique qui coordonne l'ensemble des sources et des flux énergétiques. Un contrôleur principal analyse et décide des stratégies de production, de stockage et de distribution de l'énergie. Les caractéristiques principales de ce système incluent une unité de décision unique, un contrôle global du système, des algorithmes de gestion centraux, une optimisation globale, une complexité de traitement élevée, ainsi qu'un point unique de défaillance potentiel[50].

#### I.3.3.2 Systèmes à gestion distribuée

Dans l'architecture distribuée, chaque composant du système possède une capacité de décision locale, permettant une plus grande flexibilité et résilience. Les unités communiquent et coordonnent leurs actions de manière dynamique. Les caractéristiques principales de ce système incluent une décision partagée entre les composants, l'autonomie des sous-systèmes, une communication inter-composants fluide, une résilience accrue, une adaptation dynamique, et une redondance des systèmes de contrôle.

#### I.3.3.3 Systèmes à gestion décentralisée

L'architecture décentralisée représente un niveau d'autonomie avancé (Figure I-6), où chaque source ou composant dispose d'une intelligence locale complète, avec des interactions minimales et des objectifs locaux prioritaires. Parmi ses caractéristiques principales, on trouve une autonomie maximale des composants, une très haute résilience, une adaptabilité intrinsèque, et une complexité de coordination réduite. Les caractéristiques communes incluent l'optimisation énergétique, la gestion intelligente des flux, la réactivité aux changements et des stratégies de contrôle évoluées. Les technologies habilitantes comprennent l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique, les systèmes multi-agents, les algorithmes distribués et l'électronique de puissance intelligente[51][52]. Les axes de comparaison pour ces systèmes incluent la complexité de mise en œuvre, le coût de développement, la résilience du système, l'efficacité énergétique et la flexibilité d'adaptation. Parmi les tendances émergentes, on retrouve des systèmes hybrides de gestion, l'auto-organisation, l'apprentissage collaboratif, ainsi que la prédiction et l'anticipation. Cette classification reflète l'évolution des architectures de gestion vers des systèmes de plus en plus intelligents, autonomes et adaptatifs.

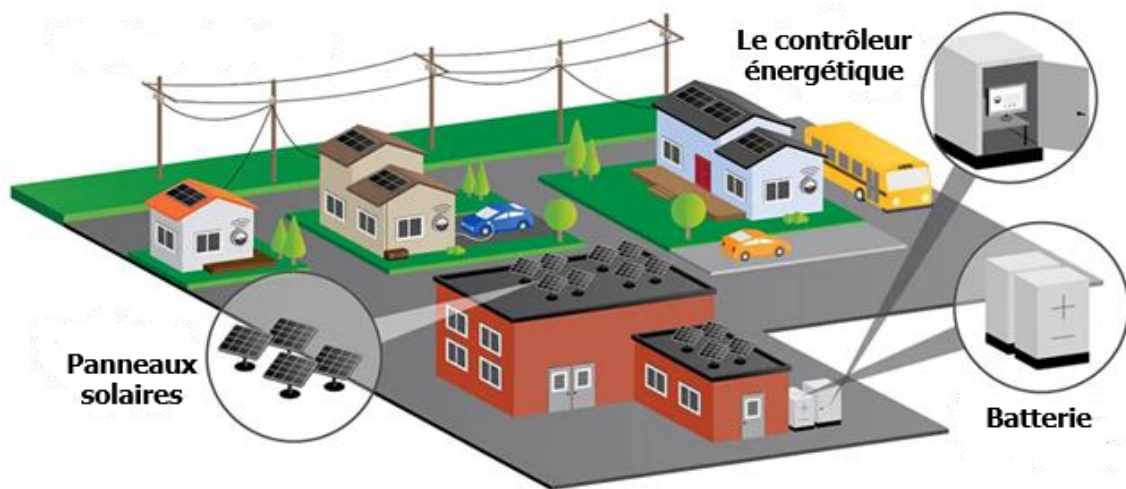


Figure I-6: Système à gestion décentralisée

### I.3.4 Classification selon mode de fonctionnement

La classification des systèmes multi-sources renouvelables selon leur mode de fonctionnement distingue trois configurations principales :

#### I.3.4.1 Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes représentent une solution énergétique complètement indépendante du réseau électrique traditionnel. Conçus pour fournir une alimentation électrique continue dans des zones isolées, ces systèmes intègrent plusieurs sources de production et des technologies de stockage pour garantir une autosuffisance énergétique totale. Parmi leurs caractéristiques principales figurent l'indépendance énergétique totale, la production locale et continue, le stockage obligatoire, l'adaptation aux environnements isolés, une résilience maximale et des technologies adaptatives[53].

#### I.3.4.2 Systèmes connectés au réseau

Les systèmes connectés au réseau établissent une interaction dynamique et bidirectionnelle avec le réseau électrique public. Ils permettent non seulement de consommer de l'électricité du réseau, mais également d'y injecter la production excédentaire, créant ainsi un écosystème énergétique intelligent et flexible. Les caractéristiques principales de ces systèmes incluent l'interaction bidirectionnelle, la possibilité de vendre de l'électricité excédentaire, l'optimisation économique, la réduction des coûts énergétiques, ainsi que la flexibilité d'approvisionnement, tout en soutenant la transition énergétique.

### I.3.4.3 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides constituent une solution évoluée combinant les avantages des modes autonome et connecté. Capables de basculer dynamiquement entre ces deux modes, ils offrent une flexibilité et une résilience optimales, s'adaptant aux conditions changeantes de production et de consommation énergétiques. Les caractéristiques principales de ces systèmes incluent un mode de fonctionnement commutable, une flexibilité maximale, une résilience énergétique, des stratégies de gestion complexes, une adaptation dynamique, et une solution polyvalente[54].

### I.3.5 Classification selon l'application

Les systèmes multi-sources renouvelables peuvent être classifiés selon leur domaine d'application, couvrant trois secteurs majeurs :

#### I.3.5.1 Applications industrielles

Dans le secteur industriel, les systèmes multi-sources visent à garantir une alimentation électrique fiable, continue et économiquement optimisée. Ils répondent aux exigences critiques de disponibilité, de performance et de durabilité des processus industriels modernes. Les caractéristiques principales incluent la continuité de production, les stratégies de délestage, une haute disponibilité, la réduction des coûts énergétiques, l'optimisation des processus et la réduction de l'empreinte carbone.

#### I.3.5.2 Applications résidentielles

Les systèmes multi-sources pour l'habitat représentent une solution innovante permettant de réduire la facture énergétique, d'améliorer le confort et de contribuer individuellement à la transition énergétique, transformant ainsi le consommateur passif en acteur énergétique actif. Parmi leurs caractéristiques principales, on retrouve l'autoconsommation, la réduction des coûts énergétiques, le confort énergétique, l'intégration de technologies domestiques intelligentes, la contribution environnementale et l'indépendance énergétique partielle.

#### I.3.5.3 Applications mobiles et transports

Dans le domaine des transports, les systèmes multi-sources poursuivent l'objectif de développer des solutions de mobilité plus efficaces, plus propres et plus durables. Ils intègrent

diverses technologies pour optimiser l'autonomie, réduire la consommation et minimiser l'impact environnemental. Les caractéristiques principales incluent des motorisations hybrides, une efficacité énergétique accrue, une réduction des émissions, des technologies embarquées avancées, des stratégies de récupération d'énergie, et une innovation technologique continue. Les axes transversaux communs comprennent l'efficacité énergétique, la résilience, la durabilité, l'optimisation économique et la contribution à la transition énergétique. Les technologies habilitantes incluent des systèmes de gestion d'énergie intelligents, l'intelligence artificielle, l'électronique de puissance avancée, des algorithmes prédictifs et des technologies de stockage innovantes. Cette classification met en lumière la diversité et le potentiel transformateur des systèmes multi-sources dans différents domaines d'application.

### **I.3.6 Classification des systèmes selon leur logique de contrôle**

Voici une classification détaillée des systèmes multi-sources selon la logique de contrôle[55]:

#### **I.3.6.1 Contrôle prédictif**

Le contrôle prédictif représente une approche anticipative de la gestion énergétique, utilisant des modèles mathématiques et des algorithmes avancés pour prévoir les besoins et optimiser la production. Cette stratégie permet d'anticiper les variations de production et de consommation, maximisant l'efficacité du système multi-sources. Ses caractéristiques principales incluent l'anticipation des flux énergétiques, la modélisation mathématique précise, l'optimisation prospective, l'utilisation d'algorithmes complexes, la minimisation des pertes et l'adaptation proactive.

Le contrôle prédictif dans les systèmes d'énergie renouvelable présente plusieurs défis. Il nécessite des technologies avancées, augmentant les coûts et la complexité de mise en œuvre. La prédiction des pannes est difficile en raison de l'imprévisibilité des sources d'énergie, comme le solaire et l'éolien. De plus, le traitement des données en temps réel demande une infrastructure robuste et des capacités d'analyse. Les erreurs de prévision peuvent entraîner des inefficacités et des pannes, et certaines entreprises sont réticentes à adopter ces technologies en raison de la résistance au changement. Enfin, des coûts récurrents d'entretien et des préoccupations sur la sécurité des données compliquent sa mise en œuvre.

### I.3.6.2 Contrôle adaptatif

Le contrôle adaptatif se caractérise par sa capacité à ajuster dynamiquement les paramètres de gestion en temps réel, en réponse aux changements des conditions de production et de consommation, permettant ainsi une flexibilité maximale et une réactivité constante aux perturbations du système. Parmi ses caractéristiques principales, on retrouve l'ajustement dynamique, l'apprentissage continu, la réactivité aux perturbations, l'optimisation en temps réel, l'utilisation d'algorithmes auto-correcteurs et une résilience accrue du système.

Le contrôle adaptatif dans les systèmes renouvelables présente des défis, notamment sa complexité de conception, sa sensibilité aux variations environnementales rapides, et le besoin de données en temps réel précises. Il entraîne également des coûts élevés d'implémentation et des difficultés d'intégration avec d'autres systèmes. De plus, il existe un risque de sur-adaptation affectant la stabilité du système, ainsi que des limitations dans la gestion des incertitudes.

### I.3.6.3 Contrôle optimal

Le contrôle optimal vise à maximiser les performances globales du système en utilisant des techniques mathématiques avancées pour trouver la configuration la plus efficace. Cette approche recherche le compromis optimal entre différents objectifs potentiellement contradictoires. Les caractéristiques principales de cette approche incluent l'optimisation globale, l'utilisation de critères de performance multiples, l'application de techniques mathématiques avancées, ainsi que la minimisation des coûts et la maximisation de l'efficacité. Cette stratégie repose sur une approche systémique permettant de traiter de manière intégrée les différents paramètres du système.

### I.3.6.4 Contrôle intelligent (IA, apprentissage automatique)

Le contrôle intelligent intègre des technologies d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour développer des systèmes de gestion énergétique autonomes et évolutifs. Ces approches permettent une adaptation continue et un apprentissage à partir des données historiques et en temps réel. Les caractéristiques principales incluent l'auto-apprentissage, la prise de décision autonome, des algorithmes évolutifs, le traitement des données massives, la prédiction avancée, et l'optimisation continue.

### I.3.6.5 Contrôle par logique floue

Le contrôle par logique floue offre une approche flexible de la gestion énergétique, capable de traiter des informations imprécises ou incomplètes, ce qui permet de gérer la complexité et l'incertitude inhérentes aux systèmes multi-sources. Parmi ses caractéristiques principales, on retrouve la gestion de l'imprécision, des règles de décision souples, le traitement des incertitudes, une approche cognitive, la robustesse aux perturbations, et une adaptation contextuelle. Les axes transversaux de cette méthode incluent l'optimisation énergétique, l'efficacité globale, la réduction des pertes, l'adaptation continue et la performance économique. Les technologies habilitantes qui soutiennent cette approche sont l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique, les systèmes multi-agents, les algorithmes évolutifs, et l'électronique de puissance intelligente.

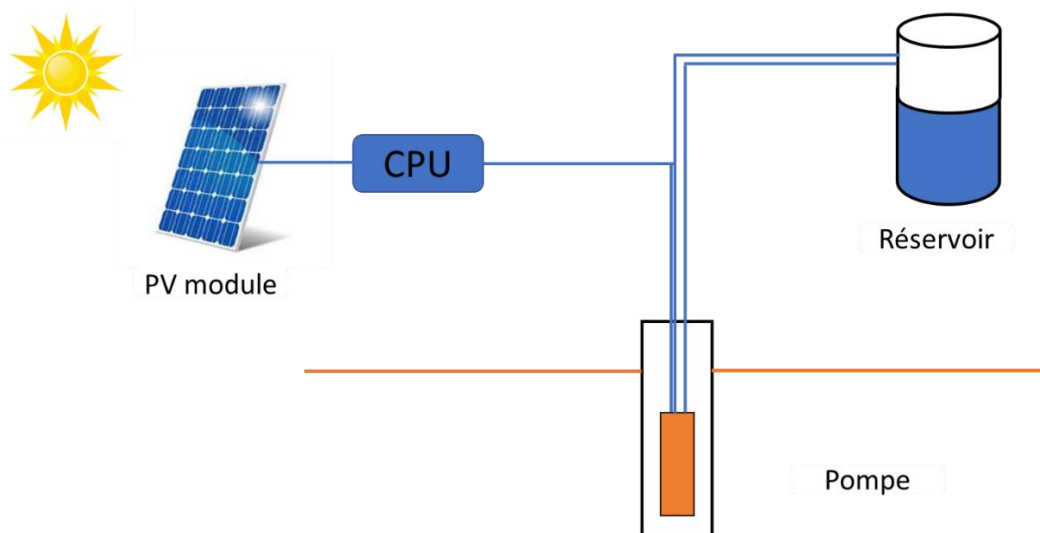
## I.4 Les système multi charge électromécanique

Les systèmes multi-charge électromécaniques combinent plusieurs applications énergétiques telles que le pompage, la climatisation et le dessalement, souvent alimentées par des sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire. Ces systèmes sont conçus pour répondre à plusieurs besoins énergétiques dans des environnements éloignés ou isolés, où l'approvisionnement en électricité est limité ou inexistant.

### I.4.1 Pompage

Le pompage de l'eau joue un rôle fondamental dans divers secteurs, notamment l'irrigation agricole, l'approvisionnement en eau potable et les applications industrielles, garantissant la disponibilité de l'eau pour les activités humaines et économiques essentielles[56]. Traditionnellement, les systèmes de pompage de l'eau dépendent du réseau électrique ou de générateurs alimentés par des combustibles fossiles, qui, bien qu'efficaces, présentent plusieurs inconvénients tels que des coûts d'exploitation élevés, une dépendance à l'égard de sources d'énergie non renouvelables et des impacts environnementaux négatifs, notamment les émissions de gaz à effet de serre et la pollution de l'air. Ces facteurs rendent les systèmes traditionnels moins viables, en particulier dans les endroits éloignés ou hors réseau où l'accès aux infrastructures électriques est limité ou inexistant. Pour relever ces défis, les systèmes de pompage de l'eau alimentés par des énergies renouvelables ont gagné en popularité en tant qu'alternative plus durable et plus efficace. Comme mentionner dans la Figure I-7, les pompes solaires photovoltaïques (PV) sont apparues comme des options viables, offrant des

solutions propres, rentables et nécessitant peu d'entretien[57]. L'intégration de progrès modernes tels que le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les pompes solaires, les systèmes hybrides renouvelables qui combinent plusieurs sources d'énergie et les technologies de surveillance intelligente utilisant l'Internet des objets (IoT) a encore amélioré la fiabilité et l'efficacité de ces systèmes. Malgré leurs nombreux avantages, les systèmes de pompage d'eau alimentés par des énergies renouvelables sont confrontés à des défis tels que les problèmes d'intermittence, les coûts d'investissement initiaux élevés et le besoin d'expertise technique pour l'installation et la maintenance. Cette revue explore les dernières innovations en matière de pompage d'eau alimenté par des énergies renouvelables, en analysant les principaux composants, avantages et obstacles, tout en discutant des solutions potentielles et des tendances futures qui peuvent améliorer l'adoption et l'efficacité de ces systèmes dans diverses applications.



**Figure I-7:** Système de pompage alimenté par énergie solaire

### I.4.1.1 Sources d'énergie renouvelables pour le pompage de l'eau

Les systèmes de pompage solaire photovoltaïque (PV) sont largement adoptés pour l'approvisionnement en eau grâce à leur modularité, fiabilité et faible maintenance, offrant une solution efficace en zones rurales et hors réseau. L'optimisation via la technologie MPPT et l'intégration de batteries garantissent un fonctionnement stable, même par faible ensoleillement. En parallèle, les pompes éoliennes, idéales dans les zones venteuses, utilisent des turbines pour produire de l'énergie mécanique ou électrique, avec des systèmes hybrides éolien-solaire compensant l'intermittence des ressources. Les micros et pico-hydrosystèmes, en exploitant l'énergie cinétique des rivières, assurent une production d'énergie constante avec

un impact environnemental minimal. Enfin, les systèmes à biomasse et biogaz, utilisant les déchets organiques pour produire de l'énergie, sont une alternative renouvelable efficace, particulièrement en milieu agricole. L'intégration de solutions hybrides, de stockage avancé et de technologies intelligentes améliore l'efficacité, la fiabilité et l'évolutivité de ces systèmes, renforçant leur rôle dans une gestion durable et décentralisée de l'eau.

### **I.4.1.2 Technologies de pompage**

Le choix des technologies de pompage est essentiel pour répondre aux besoins spécifiques des systèmes de production et de distribution d'eau. On distingue deux grandes familles des pompes selon leur principe de transfert d'énergie : les pompes centrifuges et les pompes volumétriques. Par ailleurs, suivant leur configuration d'installation vis-à-vis du point d'eau, elles se subdivisent en deux types : les pompes de surface et les pompes immergées (submersibles).

- **Pompes centrifuges**

Les pompes centrifuges sont largement utilisées dans les systèmes de pompage solaire et éolien en raison de leur efficacité énergétique et de leur capacité à gérer de grands volumes d'eau avec une faible consommation. Elles convertissent l'énergie de rotation en énergie cinétique pour déplacer l'eau, ce qui les rend idéales pour l'irrigation, l'eau potable et les usages industriels.

- **Pompes volumétriques**

Les pompes volumétriques, telles que les pompes à piston et à membrane, sont idéales pour les applications nécessitant un débit constant et une pression élevée, notamment les puits profonds, l'irrigation et l'industrie. Contrairement aux pompes centrifuges, elles déplacent un volume d'eau fixe, garantissant la stabilité du débit malgré les variations de pression. L'intégration de contrôleurs intelligents et d'algorithmes avancés optimise leur consommation d'énergie renouvelable, ajustant automatiquement leur fonctionnement en fonction de la demande et de la disponibilité énergétique. L'utilisation de matériaux résistants à la corrosion et à l'usure améliore leur durabilité et réduit la maintenance, rendant ces pompes adaptées aux zones rurales et isolées. L'intégration à des systèmes hybrides avec batteries ou accumulateurs hydrauliques garantit un fonctionnement continu malgré les intermittences de l'énergie solaire ou éolienne.

- **Pompes submersibles**

Les pompes submersibles sont essentielles pour extraire l'eau des forages et des puits profonds, offrant un rendement énergétique élevé et réduisant le risque de cavitation. Leur immersion permanente élimine le besoin d'amorçage, ce qui les rend idéales pour l'irrigation et l'approvisionnement municipal et industriel, notamment dans les zones reculées. Les récentes avancées technologiques ont amélioré leurs performances, leur durabilité et leur fiabilité, grâce à l'introduction de moteurs à haut rendement, de variateurs de fréquence (VFD) et de variateurs de vitesse intelligents, optimisant ainsi leur consommation énergétique. L'adoption de moteurs BLDC sans balais, plus robustes et compatibles avec l'énergie solaire, améliore leur efficacité dans les systèmes hors réseau. De plus, l'utilisation de matériaux résistants à la corrosion, ainsi que l'intégration de technologies d'étanchéité avancées et de surveillance IoT, permettent une maintenance prédictive et prolongent leur durée de vie. Ces développements font des pompes submersibles une solution durable, économique et essentielle pour garantir un accès fiable à l'eau, contribuant ainsi à une gestion efficace des ressources en eau.

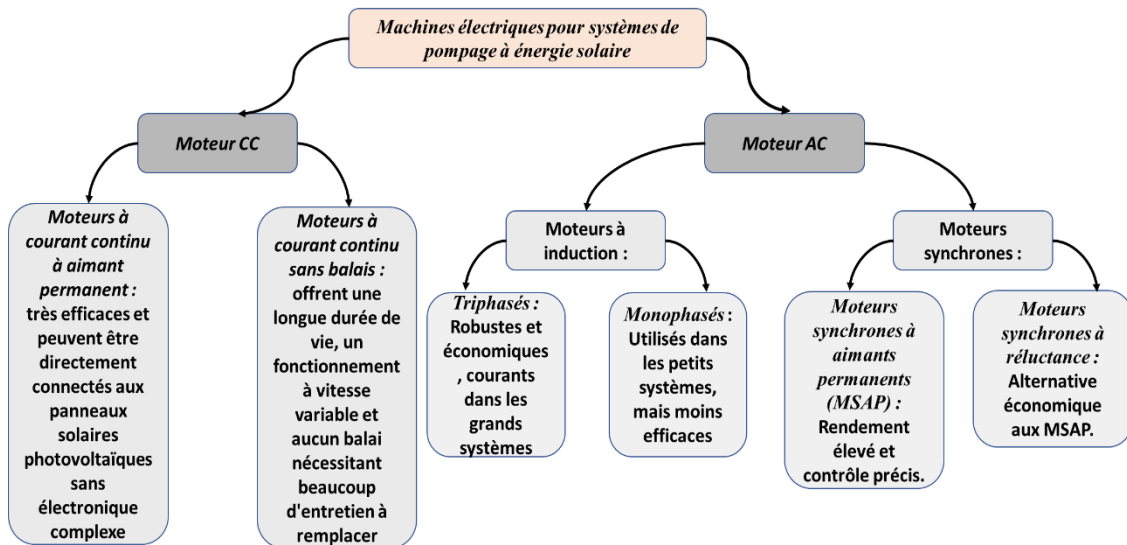
- **Pompes de surface**

Les pompes de surface constituent une catégorie de pompes positionnées au-dessus du niveau de l'eau, généralement en surface du sol ou sur une plateforme surélevée. Contrairement aux pompes immergées, elles aspirent le liquide à pomper par l'intermédiaire d'une conduite d'aspiration qui plonge dans la source d'eau. Ce type de pompe s'avère particulièrement adapté aux applications d'irrigation exploitant des sources d'eau peu profondes, telles que les réservoirs de stockage, les bâches à eau, les citernes, les bassins ou les cours d'eau de surface. Leur principal avantage réside dans leur facilité d'installation et de maintenance, l'ensemble des composants mécaniques et électriques étant accessibles sans nécessiter de démontage complexe. Cependant, leur utilisation est limitée par la profondeur d'aspiration maximale

### **I.4.1.3 Machines électriques pour systèmes de pompage à énergie solaire**

Les systèmes de pompage à énergie solaire utilisent diverses machines électriques qui peuvent être largement classées en moteurs à courant continu et moteurs à courant alternatif comme indiqué dans la figure 8, chacun avec des sous-types spécifiques optimisés pour différentes applications. Les moteurs à courant continu comprennent les moteurs à courant continu à aimant permanent (à haut rendement, à faible entretien et à compatibilité directe avec le PV solaire) et les moteurs à courant continu sans balais (offrant un rendement élevé, une longue durée de vie, un fonctionnement à vitesse variable et aucun balai à remplacer). Les moteurs à courant alternatif comprennent les moteurs à induction, qui se divisent en types

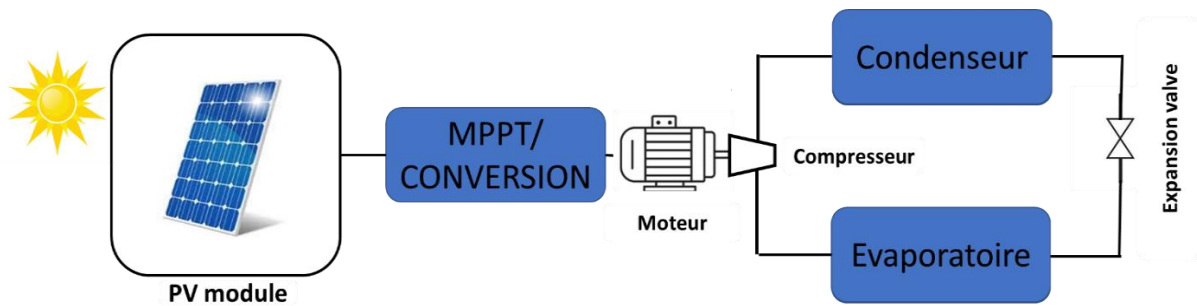
triphasés (connus pour leur conception robuste, leur faible coût, mais nécessitant un onduleur pour le PV solaire) et les variantes monophasées (courantes dans les petits systèmes, nécessitant un onduleur, avec une efficacité inférieure à celle des triphasés), ainsi que les moteurs synchrones, qui comprennent les moteurs synchrones à aimant permanent (offrant un rendement élevé, un contrôle précis de la vitesse, mais nécessitant un onduleur) et les moteurs synchrones à réluctance (offrant une bonne efficacité sans aimants permanents et un coût inférieur à celui des options PMSM).



**Figure I-8:** Classification des machines électriques pour systèmes de pompage à énergie solaire

## I.4.2 Climatisation

Les systèmes de climatisation sont essentiels au confort thermique dans les environnements résidentiels, commerciaux et industriels. Cependant, les climatiseurs conventionnels consomment des quantités importantes d'électricité, ce qui entraîne des coûts énergétiques élevés et une augmentation des émissions de carbone[58][59]. Pour relever ces défis, les systèmes de climatisation alimentés par des énergies renouvelables sont devenus une solution durable comme illustré dans la Figure I-9.



**Figure I-9:** Système de climatisation alimenté par énergie solaire

### I.4.2.1 Sources d'énergie renouvelables pour la climatisation

Les sources d'énergie renouvelables offrent des solutions durables pour la climatisation, réduisant la dépendance à l'électricité conventionnelle tout en diminuant les émissions de carbone. Les systèmes de climatisation à énergie solaire utilisent soit des panneaux photovoltaïques (PV) pour générer de l'électricité, soit des capteurs solaires thermiques pour produire de la chaleur pour les applications de refroidissement. Parmi ceux-ci, les climatiseurs solaires photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en électricité pour faire fonctionner des systèmes de refroidissement conventionnels ou à onduleur, tandis que les climatiseurs solaires thermiques utilisent des capteurs solaires pour piloter des cycles de refroidissement par absorption ou par adsorption. Les systèmes hybrides de climatisation solaire intègrent l'énergie solaire à l'électricité du réseau ou au stockage sur batterie pour assurer un fonctionnement ininterrompu, améliorant ainsi la fiabilité et l'efficacité. L'énergie éolienne présente également une alternative viable, les éoliennes produisant de l'électricité pour alimenter les climatiseurs dans des configurations hors réseau ou hybrides. L'énergie éolienne peut être efficacement intégrée dans des micro-réseaux ou combinée à un stockage sur batterie pour faire face à l'intermittence et fournir une alimentation électrique stable pour les besoins de refroidissement. L'énergie géothermique, une autre option durable, utilise des mécanismes d'échange de chaleur souterrains pour un refroidissement efficace. Cela comprend les pompes à chaleur géothermiques (PACG), qui transfèrent la chaleur entre les bâtiments et le sol pour fournir à la fois le chauffage et le refroidissement, et le refroidissement géothermique direct, où les réservoirs souterrains fournissent de l'eau réfrigérée à des fins de refroidissement. De plus, l'énergie de la biomasse, dérivée de déchets organiques ou de biocarburants, peut être utilisée pour générer de la chaleur pour les cycles de refroidissement par absorption, ce qui en fait une solution efficace pour les applications hors réseau et rurales. Avec les progrès du stockage

d'énergie et de l'intégration hybride, les systèmes de climatisation alimentés par des énergies renouvelables deviennent de plus en plus une alternative réalisable et respectueuse de l'environnement aux technologies de refroidissement conventionnelles. Les sources d'énergie renouvelables offrent des solutions durables pour la climatisation, réduisant la dépendance à l'électricité conventionnelle tout en réduisant les émissions de carbone.

### **I.4.2.2 Technologies avancées de climatisation**

Les technologies avancées de climatisation offrent des solutions innovantes et écoénergétiques pour répondre aux enjeux de réduction de la consommation énergétique, avec notamment le refroidissement par absorption et adsorption, les systèmes de refroidissement par dessiccation, et le refroidissement thermoélectrique, chacune exploitant des principes physiques distincts pour maximiser l'efficacité et minimiser l'impact environnemental.

- **Refroidissement par absorption et adsorption**

Les technologies de refroidissement par absorption et par adsorption offrent des alternatives efficaces à la climatisation conventionnelle en utilisant des sources d'énergie renouvelables pour piloter le processus de refroidissement. Les refroidisseurs à absorption fonctionnent en utilisant la chaleur de l'énergie solaire, de la biomasse ou de l'énergie géothermique pour piloter un cycle de réfrigération, réduisant ainsi considérablement la dépendance à l'électricité. Ces systèmes sont particulièrement utiles dans les applications de refroidissement industrielles et à grande échelle où l'excès de chaleur peut être réutilisé pour l'efficacité énergétique. Le refroidissement par adsorption, quant à lui, utilise des dessiccants solides tels que le gel de silice ou les zéolites pour faciliter le refroidissement à l'aide de sources de chaleur renouvelables. Contrairement aux refroidisseurs à absorption, les systèmes de refroidissement par adsorption fonctionnent à des températures plus basses, ce qui les rend bien adaptés à l'intégration avec des capteurs solaires thermiques et des systèmes de récupération de chaleur perdue. Ces deux technologies contribuent à l'avancement des solutions de refroidissement durables, offrant des alternatives économes en énergie et respectueuses de l'environnement aux méthodes de réfrigération conventionnelles, en particulier dans les régions à fort potentiel solaire ou géothermique.

- **Systèmes de refroidissement par dessiccation**

Les systèmes de refroidissement par dessiccation offrent une alternative économe en énergie à la climatisation traditionnelle en utilisant des dessiccants, comme le gel de silice ou le chlorure de lithium, pour absorber l'humidité de l'air. La régénération de ces matériaux, alimentée par la chaleur solaire ou résiduelle, réduit la consommation électrique et les émissions de gaz à effet de serre. Intégrés à des systèmes de refroidissement par évaporation ou hybrides, ils améliorent l'efficacité énergétique et la qualité de l'air intérieur, notamment dans les climats chauds et humides. Cette technologie durable s'impose comme une solution prometteuse pour un contrôle climatique plus écologique.

- **Refroidissement thermoélectrique**

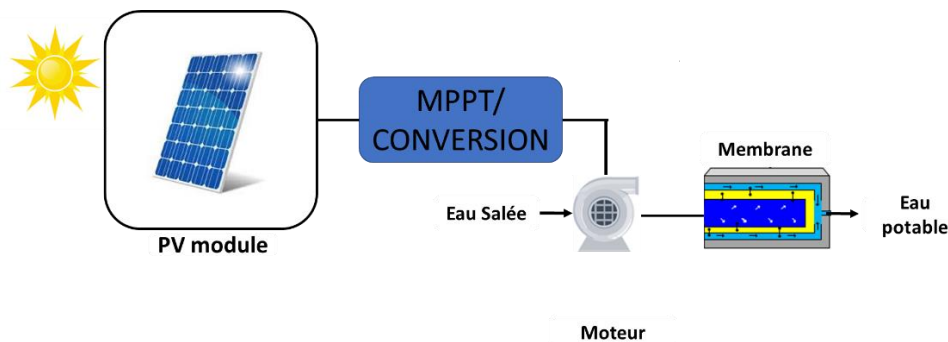
Les climatiseurs thermoélectriques, basés sur l'effet Peltier, assurent le refroidissement sans réfrigérant ni compresseur mécanique, en transférant la chaleur par courant continu (DC). Compatibles avec les sources d'énergie renouvelables telles que le solaire et l'éolien, ils fonctionnent efficacement à basse tension, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles. Compacts, silencieux et nécessitant peu d'entretien, ils sont parfaits pour le refroidissement localisé (électronique, médical, militaire). Cependant, leur efficacité énergétique reste inférieure à celle des systèmes à compresseur, ce qui limite leur utilisation généralisée. Les progrès des nanotechnologies et des matériaux thermoélectriques améliorent leur efficacité, ouvrant la voie à une climatisation plus durable intégrant les énergies renouvelables, notamment pour les zones hors réseau.

### **I.4.3 Dessalement**

Le dessalement est une technologie essentielle pour répondre à la pénurie mondiale d'eau en convertissant l'eau de mer ou l'eau saumâtre en eau potable comme illustré à la Figure I-10, jouant un rôle essentiel pour assurer la sécurité hydrique dans les régions confrontées à des pénuries d'eau douce. Face aux préoccupations croissantes concernant la croissance démographique, le changement climatique et l'épuisement des ressources naturelles en eau, le dessalement est devenu une solution de plus en plus vitale pour répondre à la demande croissante en eau propre. Cependant, les procédés de dessalement conventionnels, tels que l'osmose inverse (OI) et la distillation thermique, sont très énergivores et dépendent historiquement des combustibles fossiles qui contribuent aux émissions de gaz à effet de serre et augmentent les coûts d'exploitation[60].

L'intégration des énergies renouvelables dans les processus de dessalement constitue une alternative durable qui atténue les impacts environnementaux tout en améliorant la viabilité économique des technologies de dessalement. En utilisant des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la géothermie et la biomasse, les usines de dessalement peuvent réduire leur dépendance aux combustibles fossiles, réduire les émissions de carbone et améliorer l'efficacité énergétique. Les avancées technologiques dans les systèmes de dessalement alimentés par des énergies renouvelables, notamment les membranes à haut rendement, les dispositifs de récupération d'énergie et les solutions énergétiques hybrides, améliorent continuellement les performances et la rentabilité[61].

Ce document fournit un aperçu complet de l'état actuel des technologies de dessalement alimentées par des énergies renouvelables, analysant les derniers développements, défis et tendances futures. Il explore différentes sources d'énergie renouvelables applicables au dessalement, examine les méthodes de dessalement innovantes et évalue le stockage d'énergie et les systèmes de contrôle intelligents qui améliorent l'efficacité. En comprenant ces avancées, les chercheurs, les décideurs politiques et les professionnels de l'industrie peuvent contribuer à l'adoption généralisée de solutions de dessalement durables, garantissant une approche fiable et respectueuse de l'environnement de la production d'eau douce.



**Figure I-10:** Système de dessalement alimenté par énergie solaire

### I.4.3.1 Sources d'énergie renouvelables pour le dessalement

Les énergies renouvelables offrent des alternatives durables pour le dessalement, réduisant la dépendance aux combustibles fossiles. L'énergie solaire est la plus utilisée, avec des systèmes qui alimentent l'osmose inverse et des méthodes thermiques comme la distillation à effets multiples et la vaporisation éclair. Une approche plus simple est la distillation solaire, efficace pour les petites applications. L'énergie éolienne permet d'alimenter l'osmose inverse et, combinée au solaire, assure une alimentation stable. L'énergie géothermique est exploitée

dans le dessalement thermique, offrant une alternative fiable avec un impact minimal. Enfin, l'énergie de la biomasse, issue des déchets organiques, produit de l'électricité ou de la chaleur pour le dessalement, idéale pour les zones isolées. L'intégration de ces énergies et l'amélioration des systèmes hybrides renforcent la viabilité à long terme du dessalement durable.

### **I.4.3.2 Technologies avancées de dessalement**

L'osmose inverse est la méthode la plus courante et son intégration aux énergies renouvelables réduit considérablement la consommation d'énergie grâce aux dispositifs de récupération d'énergie et aux membranes à haut rendement. La distillation membranaire (DM), fonctionnant à basse température, est idéale avec l'énergie solaire et géothermique, offrant une alternative modulaire adaptée aux zones reculées. L'électrodialyse (ED) et la déionisation capacitive (CDI) sont des solutions écoénergétiques pour le traitement des eaux saumâtres, compatibles avec l'énergie solaire et éolienne. Les distillateurs solaires exploitent l'énergie solaire pour produire de l'eau douce à petite échelle, grâce à des améliorations telles que les MCP et les matériaux nanophotoniques. Ces technologies promettent un dessalement durable et efficace, adapté aux régions où l'eau est rare.

### **I.4.4 Stockage d'énergie**

Les systèmes de stockage d'énergie sont essentiels pour assurer une alimentation électrique fiable et continue pour des applications telles que le pompage, la climatisation et le dessalement, lorsqu'ils sont alimentés par des systèmes photovoltaïques. Dans les systèmes de pompage solaire, les batteries ou autres dispositifs de stockage accumulent l'excédent d'énergie produit pendant les périodes d'ensoleillement maximal, permettant aux pompes de fonctionner même en l'absence de rayonnement solaire, garantissant ainsi une gestion optimale des ressources en eau. Pour la climatisation solaire, les solutions de stockage atténuent le caractère intermittent de la production photovoltaïque, assurant un refroidissement continu et améliorant le confort thermique. Dans le dessalement, souvent utilisé dans les zones arides, le stockage permet aux procédés énergivores tels que l'osmose inverse ou l'électrodialyse de continuer à fonctionner même lorsque la production solaire est insuffisante. Ces systèmes de stockage, qu'il s'agisse de batteries lithium-ion, de supercondensateurs ou d'autres technologies innovantes, jouent donc un rôle clé dans l'efficacité énergétique, la durabilité et l'autonomie de ces installations, tout en réduisant leur empreinte carbone et leur dépendance aux sources d'énergie conventionnelles.

### I.4.5 Systèmes de contrôle et de surveillance intelligents

Les avancées technologiques dans les domaines du pompage, de la climatisation et du dessalement sont aujourd'hui fortement influencées par l'intégration de l'intelligence artificielle (IA), de l'Internet des objets (IoT) et des réseaux intelligents, optimisant la gestion de l'énergie et améliorant l'efficacité opérationnelle. Dans les systèmes de pompage d'eau alimentés par des énergies renouvelables, l'automatisation et les contrôleurs intelligents permettent une gestion efficace via la surveillance en temps réel et l'optimisation des performances, garantissant une meilleure fiabilité et une maintenance prédictive basée sur l'IA. L'IoT facilite le suivi des débits, de la consommation énergétique et des performances des pompes, tandis que les systèmes hybrides intelligents assurent un basculement automatique entre les sources d'énergie solaires, éoliennes et batteries, améliorant ainsi la continuité du service, en particulier dans les régions éloignées. De même, dans les systèmes de climatisation, l'intégration de l'IA et de l'IoT transforme l'efficacité énergétique en ajustant dynamiquement les performances du système selon la demande et la disponibilité des énergies renouvelables. L'IoT permet une surveillance des conditions ambiantes (température, humidité, qualité de l'air) et un ajustement intelligent de la consommation d'énergie, tandis que l'IA prédit les besoins en refroidissement et optimise l'utilisation des ressources énergétiques. Dans les systèmes de dessalement, ces technologies facilitent l'optimisation de la distribution énergétique et la gestion des fluctuations de la demande en eau, réduisant ainsi le gaspillage d'énergie et améliorant la rentabilité. La maintenance prédictive, basée sur l'analyse des données en temps réel, contribue à limiter les temps d'arrêt et à prolonger la durée de vie des équipements, rendant ces infrastructures plus résilientes, efficaces et adaptées à une adoption à grande échelle. Grâce à ces innovations, les systèmes de pompage, de climatisation et de dessalement deviennent plus autonomes, intelligents et durables, favorisant l'accès à l'eau et à un refroidissement efficace tout en réduisant l'empreinte carbone.

### I.4.6 Défis et Perspectives des Énergies Renouvelables pour le Pompage, la Climatisation et le Dessalement

Les systèmes de pompage, de climatisation et de dessalement alimentés par des énergies renouvelables font face à des défis communs : intermittence énergétique, coûts d'investissement élevés et manque d'expertise technique pour l'installation et la maintenance. Les fluctuations météorologiques limitent la fiabilité, nécessitant des solutions de stockage d'énergie (batteries lithium-ion, supercondensateurs, stockage thermique) qui restent

coûteuses. Le manque de financement et l'absence de subventions adaptées compliquent l'adoption, notamment dans les régions en développement. Pour y remédier, des avancées dans les systèmes hybrides (solaire-éolien-biomasse), le développement de membranes performantes et l'intégration de l'IA et de l'IoT optimisent la gestion énergétique et la maintenance prédictive. Le soutien gouvernemental, les incitations fiscales et la microfinance communautaire jouent un rôle clé dans leur accessibilité. Avec ces innovations, l'efficacité, la fiabilité et l'accessibilité des énergies renouvelables dans ces secteurs s'améliorent, contribuant à un avenir durable et résilient face aux défis environnementaux et hydriques mondiaux.

### I.5 Conclusion

Les systèmes multi-sources renouvelables occupent une place centrale dans la transition énergétique, avec une attention particulière portée aux solutions performantes comme le photovoltaïque. Cette technologie s'impose aujourd'hui comme un choix privilégié grâce à son adaptabilité à divers contextes, notamment dans les régions ensoleillées où son potentiel est maximisé. Abondante et propre, l'énergie solaire devient un pilier incontournable de la production d'énergie durable.

Sur le plan électromécanique, les systèmes de pompage, de dessalement et de climatisation reposent sur des principes communs tels que l'utilisation de moteurs électriques, la régulation de la pression et le transfert de chaleur. L'intégration des énergies renouvelables, telles que le solaire et l'éolien, améliore leur efficacité tout en réduisant leur empreinte carbone.

Les systèmes de pompage se démarquent par leur faible consommation énergétique, leur simplicité et leur compatibilité idéale avec les sources renouvelables, ce qui les rend particulièrement adaptés pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau, même dans les zones isolées. Leur coût réduit, leur évolutivité et leur faible besoin de maintenance en font une alternative avantageuse par rapport aux solutions plus complexes comme le dessalement.

Les avancées en automatisation et intelligence artificielle renforcent encore leur efficacité, consolidant leur rôle clé dans les infrastructures hydrauliques mondiales. Enfin, la modularité du photovoltaïque et la corrélation naturelle entre les périodes d'ensoleillement maximal et les besoins en irrigation en font une solution particulièrement bien adaptée pour les applications de pompage.

Le photovoltaïque est essentiel dans la transition énergétique, offrant une énergie propre, renouvelable et adaptable, notamment en zones isolées. Il réduit la dépendance aux énergies fossiles, comme nous le verrons dans le prochain chapitre.

### CHAPITRE II Systèmes photovoltaïques, technologies et optimisation

#### II.1 Introduction

L'électricité est essentielle à la vie moderne, mais sa production à partir de combustibles fossiles pose des défis environnementaux et économiques majeurs. L'augmentation de la demande, alimentée par la croissance démographique et la recherche du bien-être, accentue la nécessité de sources d'énergie durables.

La production d'électricité solaire repose sur le principe de l'effet photovoltaïque, où l'énergie lumineuse est directement convertie en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques, constituants fondamentaux des modules solaires. Grâce aux avancées technologiques, ces cellules offrent aujourd'hui des rendements de plus en plus élevés, positionnant l'énergie photovoltaïque comme une alternative crédible et durable aux énergies fossiles. Son abondance, son faible impact environnemental et sa capacité à répondre aux défis énergétiques mondiaux suscitent un intérêt croissant de la part des chercheurs, des ingénieurs et des décideurs politiques, accompagnés par une augmentation des investissements en recherche et développement[62]. Les progrès dans la fabrication des modules ont permis de réduire considérablement les coûts tout en améliorant la qualité et la fiabilité des équipements. En parallèle, l'évolution de l'électronique de puissance a favorisé l'émergence de systèmes photovoltaïques de petite puissance, notamment raccordés aux réseaux basse tension, adaptés aux environnements résidentiels et urbains[63][64]. Dans ce contexte, la modélisation et la caractérisation précises des cellules photovoltaïques deviennent essentielles pour comprendre les mécanismes de conversion, prédire le comportement des systèmes selon les conditions environnementales, et optimiser leur performance. Ces approches constituent des leviers stratégiques pour garantir une intégration efficace des systèmes PV dans les réseaux énergétiques intelligents[65].

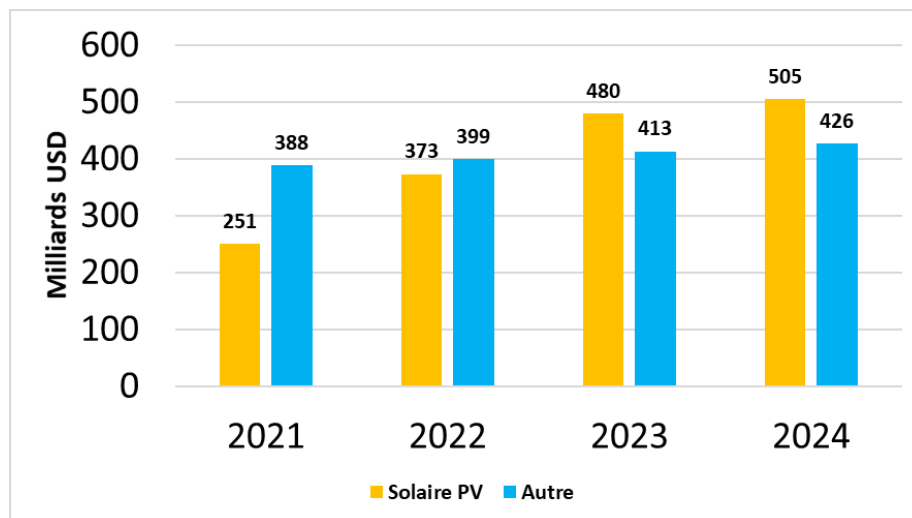
#### II.2 Contexte et évolution du photovoltaïque

##### II.2.1 Le développement du marché mondial de l'énergie photovoltaïque

Le marché mondial de l'énergie photovoltaïque (PV) connaît une croissance sans précédent, propulsée par une demande croissante de solutions d'énergie renouvelable et des politiques gouvernementales favorables.

Les données montrent une progression spectaculaire des investissements dans le solaire PV, qui ont doublé en quatre ans, passant de 251 milliards USD en 2021 à une estimation de 503

milliards USD pour 2024, tandis que les autres technologies de génération n'ont connu qu'une croissance modeste, évoluant de 388 milliards USD à 426 milliards USD sur la même période. Un tournant décisif s'est produit en 2022, lorsque le solaire PV a presque rattrapé les autres technologies, avant de les dépasser significativement en 2023 avec un écart de 67 milliards USD, une tendance qui s'accroît encore en 2024 avec un différentiel projeté de 77 milliards USD, reflétant ainsi plusieurs facteurs convergents : la baisse continue des coûts de production des panneaux solaires, l'amélioration de leur efficacité, la maturité technologique croissante, l'adaptabilité à diverses échelles de déploiement, les politiques publiques favorables et l'engagement croissant du secteur privé dans la transition énergétique, témoignant d'une confiance accrue des investisseurs dans la viabilité économique à long terme du solaire photovoltaïque et son rôle central pour atteindre les objectifs de neutralité carbone fixés par de nombreux pays et entreprises à l'horizon 2050.



**Figure II-1:** Investissement annuel mondial dans l'énergie solaire photovoltaïque et d'autres technologies de production 2021-2024 [66]

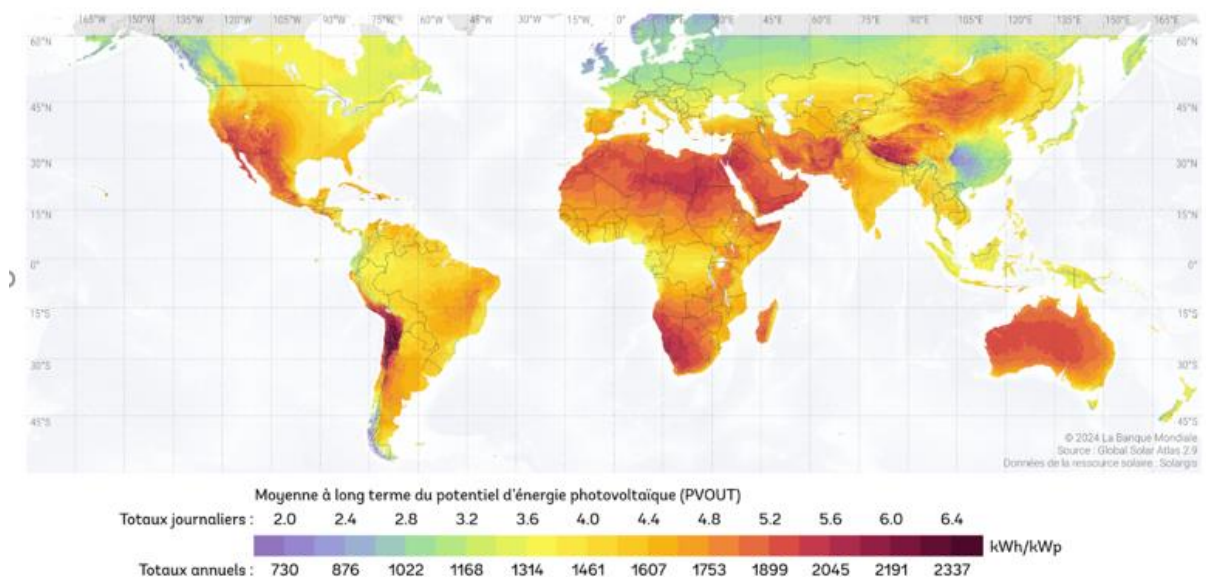
### II.2.2 Historique et évolution des technologies photovoltaïques

En 1839, Alexandre Edmond Becquerel a fait une découverte révolutionnaire qui allait façonner l'avenir des technologies photovoltaïques (PV). Depuis, des avancées significatives ont transformé les systèmes photovoltaïques en une source d'énergie viable, les systèmes PV représentent désormais une réelle possibilité de production d'énergie. Alors que les premières cellules solaires n'avaient qu'un rendement de 6 %, les cellules actuelles peuvent atteindre des rendements de 20 à 22 % [67]. Enriquez et al [68], ont constaté que les nouvelles technologies,

## CHAPITRE II Systèmes photovoltaïques, technologies et optimisation

telles que les couches minces, les cellules multi jonctions et les cellules à pérovskite, ont permis de réduire les coûts et d'obtenir des rendements supérieurs aux méthodes traditionnelles, permettant ainsi leur utilisation à plus grande échelle.

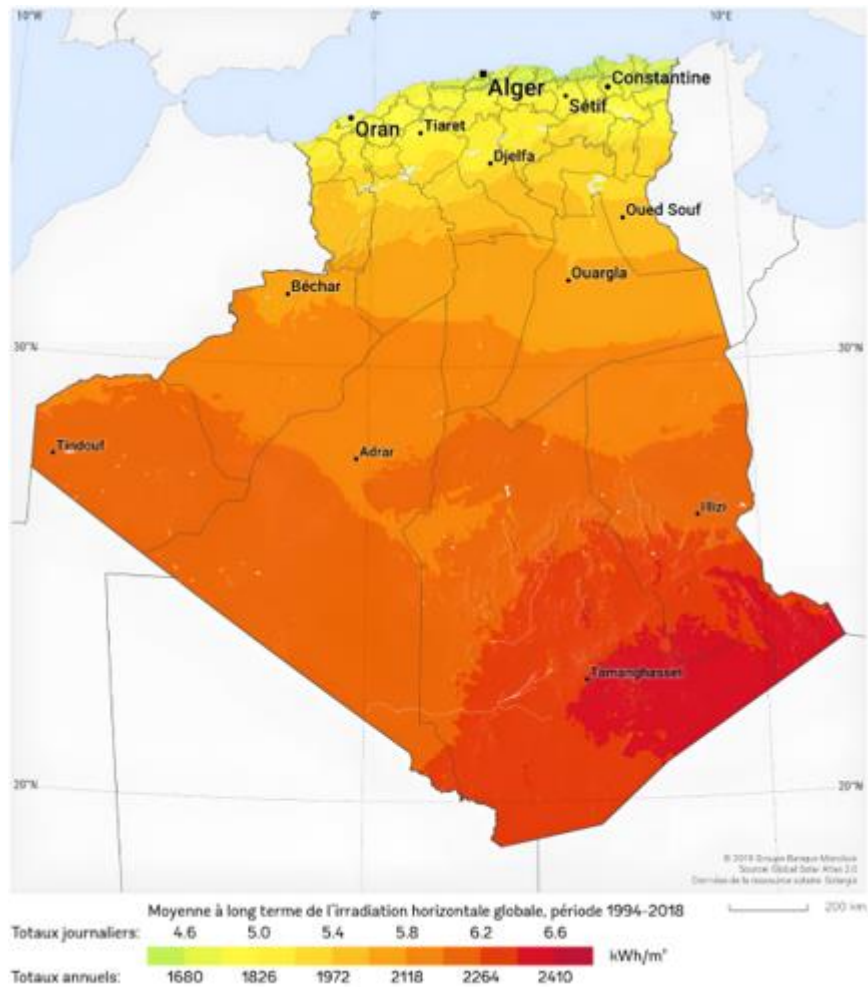
L'énergie solaire présente un potentiel considérable à l'échelle mondiale ainsi que des caractéristiques environnementales très attrayantes (voir Figure II-2)[69]. La transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques peut être qualifiée comme un processus de production énergétique remarquable. La gratuité de l'énergie solaire, sa propreté et son abondance, ainsi que son faible niveau sonore et son entretien minimal, contribuent à en faire une source d'énergie prometteuse pour l'avenir.



**Figure II-2:** Potentiel d'énergie photovoltaïque[69]

Dans ce cadre, le relief de l'Algérie se distingue par une vaste zone saharienne recevant d'importantes quantités de rayonnement solaire direct. Il pourrait s'avérer plus judicieux pour les essais et la mise en place durable de systèmes de production d'énergie solaire utilisant des panneaux photovoltaïques. L'Algérie se distingue en tant que le pays le plus vaste du continent africain, couvrant une superficie de 2 381 741 km<sup>2</sup>, dont 86% est constitué de zones désertiques. Le pays se trouve à la frontière de l'Afrique du Nord, situé entre les latitudes 38 et 35 degrés nord et les longitudes 8 et 12 degrés est. Il est délimité par la mer Méditerranée au nord et par le Sahara au sud. Les régions situées au nord de l'Algérie présentent une densité de couverture végétale plus élevée que celles du sud. Les régions sahariennes bénéficient d'un apport énergétique plus important, cependant elles se distinguent par des températures atmosphériques

plus élevées. La Figure II-3 synthétise l'irradiation horizontale globale GHI - une moyenne à long terme des totaux quotidiens et annuels pour l'Algérie[70] .



**Figure II-3:**Irradiation horizontale globale-Algérie [70]

L'évolution des désirs planétaires pour les modules a toujours joué un rôle crucial dans les fluctuations des prix. Pourtant, les tendances actuelles et les prévisions de demande sont aussi changeantes qu'un caméléon en pleine crise d'identité.

Depuis de nombreuses décennies, une quête effrénée anime les scientifiques et les ingénieurs des laboratoires nationaux, des universités et des entreprises privées : celle de découvrir de nouveaux types de cellules et d'améliorer les performances de celles déjà connues. En effet, l'élusivité parfaite demeure encore à inventer.

### II.3 Principes fondamentaux du photovoltaïque

L'effet photovoltaïque convertit le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules solaires. Cependant, ce processus est sensible aux variations des conditions environnementales, ce qui affecte le rendement global des installations photovoltaïques.

#### II.3.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique fondamental où certains matériaux semi-conducteurs génèrent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière, constituant ainsi la base de la conversion de l'énergie solaire. Lorsque les photons du soleil frappent un matériau semi-conducteur comme le silicium, ils transfèrent de l'énergie aux électrons, les excitant de la bande de valence à la bande de conduction et créant des paires électron-trou. Dans une cellule solaire, ces porteurs de charge sont séparés par un champ électrique intégré à la jonction p-n, empêchant la recombinaison et générant une différence de potentiel. Connectée à un circuit externe, cette tension propulse les électrons à travers le circuit, produisant ainsi de l'électricité utilisable. L'efficacité de ce processus dépend de facteurs tels que la bande interdite du semi-conducteur, la conception de la cellule, le spectre lumineux et la température de fonctionnement. Les cellules solaires commerciales modernes convertissent généralement 15 à 22 % de l'énergie solaire incidente en électricité[71].

#### II.3.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire, énergie émise par le Soleil sous forme d'ondes électromagnétiques comprenant lumière visible (52%), rayons ultraviolets (4%) et infrarouge[72], est essentiel à la vie terrestre tout en présentant des risques sanitaires nécessitant des mesures de protection. L'irradiance solaire, mesurée en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ), influence directement les performances des systèmes photovoltaïques - une augmentation pouvant améliorer la production d'énergie de plus de 20% dans des conditions optimales[73], bien que cette relation ne soit pas linéaire puisqu'une irradiation plus élevée augmente également la température des cellules, réduisant leur efficacité au-delà de 25°C en raison d'une conductivité accrue dans les semi-conducteurs. Les systèmes photovoltaïques, conçus pour transformer cette lumière en électricité utilisable, comprennent des cellules convertissant la lumière en courant continu, des onduleurs transformant ce courant en alternatif, et souvent des batteries pour stocker l'énergie excédentaire, se déclinant en systèmes connectés au réseau, hors réseau ou hybrides qui sont essentiels aux politiques énergétiques modernes visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les variations d'irradiation affectent

directement la production d'énergie - le courant augmentant proportionnellement à l'irradiation tandis que la tension reste plus stable, avec des défis comme les pertes par inadéquation lors d'ombrage partiel et la dégradation progressive des modules, problèmes atténués par des technologies comme le MPPT qui adapte le système aux changements d'irradiation en temps réel.

### II.3.3 Impact des conditions environnementales

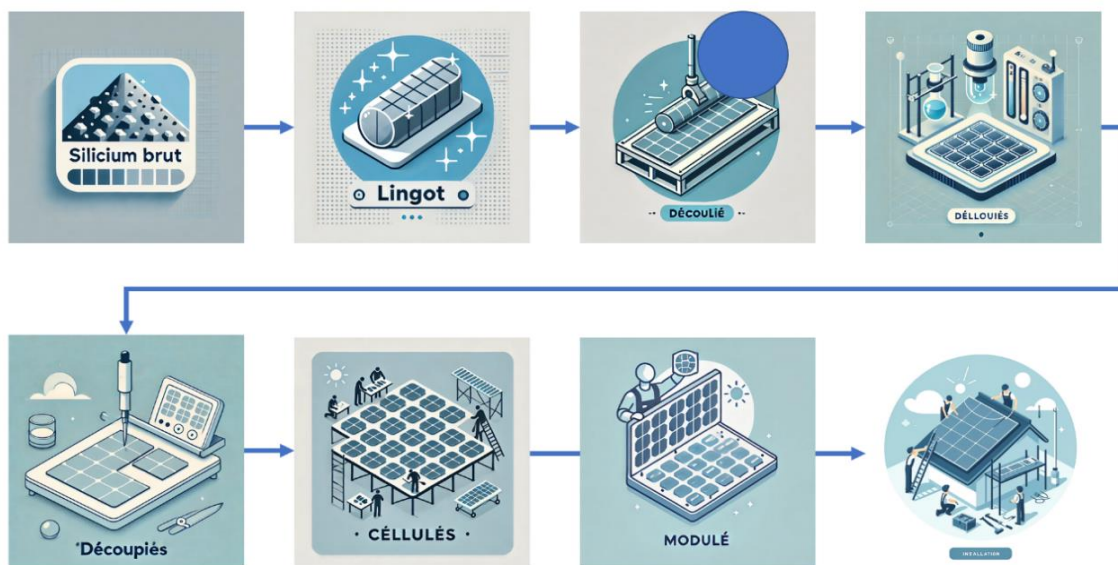
Les performances des systèmes photovoltaïques sont étroitement liées aux conditions environnementales locales, qui influencent directement la quantité d'énergie produite.

Les performances des systèmes photovoltaïques (PV) sont fortement influencées par les conditions environnementales, notamment la température. En effet, une augmentation de la température au-delà de 25 °C entraîne une diminution du rendement des cellules photovoltaïques d'environ 0,4 à 0,5 % par degré supplémentaire, en raison de l'augmentation de la résistance interne et de la diminution de la tension à vide [74]. L'humidité, tout comme la poussière ou les particules en suspension dans l'air, peut encrasser la surface des modules, réduisant ainsi l'irradiance reçue et affectant le rendement global. De plus, l'irradiation solaire (quantité d'énergie solaire incidente) constitue le facteur déterminant de la puissance instantanée générée. Pour atténuer l'impact des variations environnementales et exploiter au mieux le rayonnement disponible, des techniques d'optimisation telles que le suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont utilisées. Ces dispositifs électroniques adaptent en temps réel le fonctionnement du système afin de maximiser la production d'énergie quelles que soient les conditions climatiques.

### II.4 Composants des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques reposent sur une chaîne de composants interdépendants, chacun jouant un rôle crucial dans la transformation de la lumière solaire en énergie électrique utilisable. Tout commence par le silicium brut, extrait du sable ou d'autres minerais, qui constitue la matière première essentielle pour fabriquer les cellules solaires. Ce silicium est ensuite purifié et transformé en lingots de haute pureté grâce à des techniques comme la cristallisation sous tension ou l'immersion directe. Ces lingots sont ensuite découpés en fines tranches appelées wafers, qui subissent des traitements spécifiques pour améliorer leurs propriétés électriques, notamment via le dopage pour créer des jonctions p-n nécessaires à la conversion photovoltaïque. Les wafers sont ensuite découpés en petites cellules individuelles, qui sont assemblées en séries ou en parallèles pour former des modules solaires. Ces modules sont encapsulés dans des matériaux

protecteurs, tels que du verre ou des polymères, afin de garantir leur durabilité face aux intempéries et aux rayonnements UV tout en maximisant la transmission lumineuse. Une fois prêts, les modules sont installés sur des toits, des structures au sol, ou intégrés dans des systèmes flottants, où ils sont connectés à un onduleur pour convertir le courant continu produit en courant alternatif, rendant l'électricité compatible avec les besoins des appareils électriques. Chaque étape de ce processus, depuis le silicium brut jusqu'à l'installation finale, contribue à la fiabilité et à l'efficacité des systèmes photovoltaïques, permettant ainsi une transition énergétique durable voir Figure II-4.



**Figure II-4:**Étapes de fabrication et d'installation d'un panneau photovoltaïque

### II.4.1 Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs qui convertissent la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Cette section aborde les différents types de cellules photovoltaïques, les matériaux semi-conducteurs utilisés, ainsi que principe de fonctionnement et les technologies de fabrication et de caractérisation.

#### II.4.1.1 Types des cellules

Les cellules solaires se déclinent en plusieurs types, chacun ayant ses propres caractéristiques et applications. Les cellules solaires en silicium monocristallin sont les plus efficaces, bien que coûteuses à produire, tandis que les cellules en silicium polycristallin offrent une efficacité légèrement inférieure mais sont plus populaires en raison de leur coût réduit. Les cellules en silicium amorphe, bien que moins efficaces, sont économiques à fabriquer. Les

matériaux cristallins alternatifs, comme l'arséniure de gallium, offrent une efficacité supérieure mais à un coût plus élevé [75][76]. Les cellules solaires à couche mince, telles que celles en tellure de cadmium, sont les moins chères à produire et utilisent des techniques comme la déposition par vapeur ou l'impression. Les cellules solaires organiques et sensibilisées par colorant représentent des alternatives extrêmement économiques. Les cellules solaires de troisième génération, telles que les cellules à points quantiques et les cellules tandem, visent à dépasser la limite de Shockley-Queisser en combinant différents matériaux pour maximiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire [77]. Les cellules solaires flexibles, comme celles en forme de fibre, offrent des avantages en termes de légèreté et de coût, tout en améliorant la flexibilité et les propriétés des cellules solaires traditionnelles.

### II.4.1.2 Matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont essentiels dans la fabrication des cellules photovoltaïques, car ils déterminent l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité. Le silicium, sous ses formes cristalline, multicristalline, amorphe et microcristalline, est le matériau le plus couramment utilisé, représentant plus de 80 % de la production mondiale de cellules photovoltaïques [78]. Les cellules photovoltaïques organiques et à base de pérovskites émergent également comme alternatives prometteuses, offrant des avantages en termes de flexibilité, de coût et de facilité de fabrication. Ces avancées dans les matériaux semi-conducteurs permettent non seulement d'améliorer l'efficacité des cellules solaires, mais aussi de réduire leur impact environnemental grâce à des processus de fabrication plus durables et à l'utilisation de matériaux recyclés [79].

### II.4.1.3 Assemblage et fonctionnement

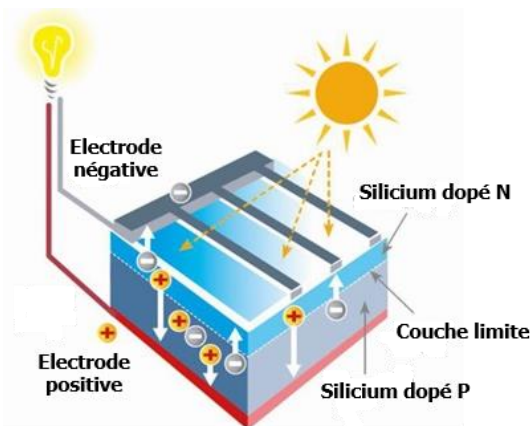
- **Assemblage**

Les cellules photovoltaïques sont assemblées en modules solaires à travers un processus rigoureux visant à garantir leur performance et leur durabilité. Ce processus commence par la connexion électrique des cellules individuelles en série à l'aide de rubans conducteurs soudés aux barres omnibus. Les chaînes de cellules ainsi formées sont ensuite disposées sur une feuille de verre trempé, recouvertes d'une couche d'encapsulant en éthylène-acétate de vinyle (EVA), puis d'une feuille arrière en polymère[80]. L'ensemble est soumis à une étape de laminage sous vide, où la chaleur et la pression lient les couches ensemble, formant un module robuste et résistant aux intempéries. Après laminage, une boîte de jonction est fixée à l'arrière du module pour faciliter les connexions électriques et empêcher le flux de courant inverse. Enfin, un cadre

en aluminium est ajouté sur les bords du module pour fournir un support structurel et protéger contre les facteurs environnementaux[81]. Tout au long de ce processus, des mesures de contrôle de la qualité sont mises en œuvre à différentes étapes pour garantir que le produit final répond aux normes de performance et soit fiable pour une utilisation à long terme dans les applications d'énergie solaire.

- **Fonctionnement**

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui convertit directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Elle est composée de deux couches de silicium dopé : une couche de silicium dopé N (chargée négativement) et une couche de silicium dopé P (chargée positivement). Lorsque les photons du soleil frappent la cellule, ils transmettent leur énergie aux électrons du silicium, ce qui provoque une séparation des charges : les électrons sont attirés vers la couche N et les trous vers la couche P. Cette séparation crée un courant électrique continu lorsque les électrons circulent à travers un circuit externe reliant les deux électrodes (positive et négative).



**Figure II-5** : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### II.4.2 Les modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques (PV) sont des assemblages de cellules photovoltaïques qui convertissent la lumière solaire en électricité. Cette section aborde la structure et le fonctionnement des modules, les technologies d'encapsulation et d'assemblage, ainsi que les caractéristiques électriques des modules.

#### II.4.2.1 Structure

Un module photovoltaïque est composé de plusieurs éléments clés. Les cellules photovoltaïques, généralement en silicium monocristallin ou polycristallin, sont disposées en

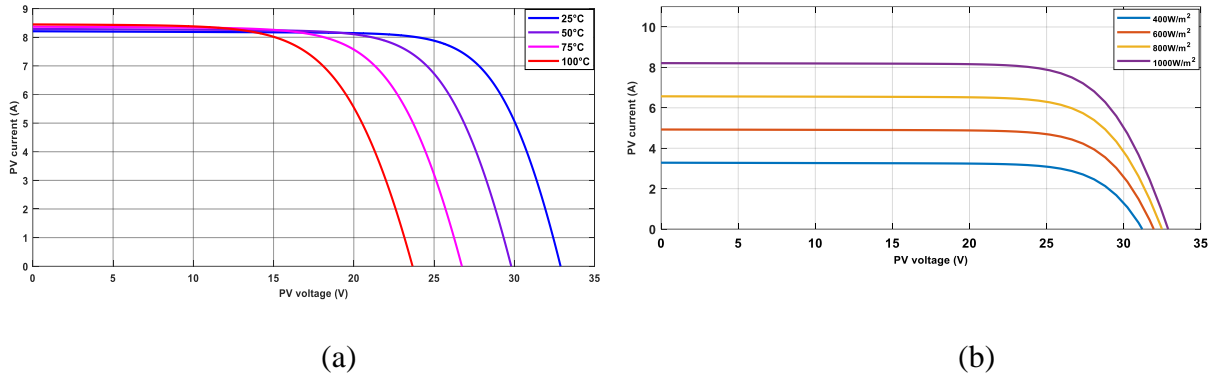
série et en parallèle pour atteindre la tension et le courant souhaités. Un verre de protection recouvre les cellules pour les protéger des intempéries tout en permettant à la lumière de passer. Les cellules sont également encapsulées dans un matériau polymère, souvent un gel silicone, pour les protéger contre l'humidité, la poussière et les chocs mécaniques. Un cadre en aluminium entoure le module pour assurer sa rigidité et faciliter son installation, tandis qu'un boîtier de jonction contient les connexions électriques et permet de relier le module au système électrique.

### II.4.2.2 Fonctionnement

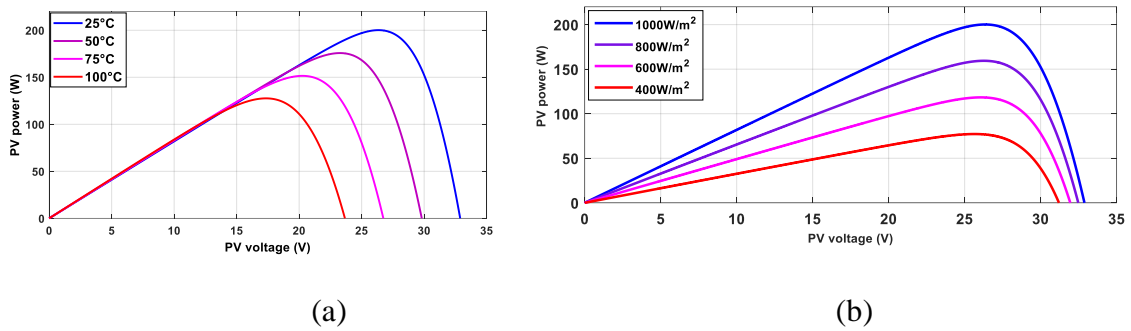
Les modules sont conçus pour capter un maximum de lumière solaire et convertir cette énergie en électricité de manière stable et durable. Le courant généré par chaque cellule s'additionne selon leur configuration (série ou parallèle), et le module alimente ensuite des systèmes électriques autonomes ou est raccordé à un réseau électrique via un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif.

### II.4.2.3 Caractéristiques électriques

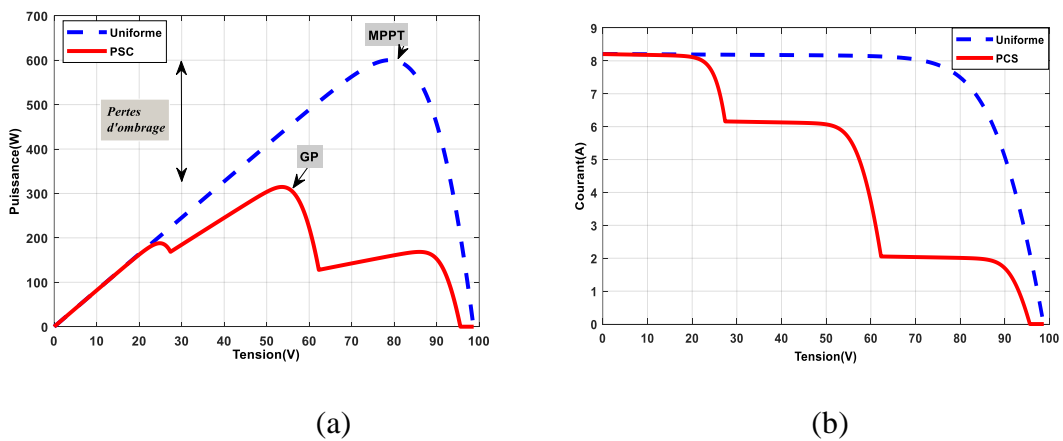
Les caractéristiques électriques des modules photovoltaïques sont essentielles pour évaluer leur performance, et plusieurs paramètres clés doivent être pris en compte. Parmi ceux-ci, les courbes I-V (Intensité-Tension) représentent la relation entre le courant généré par le module et la tension appliquée, permettant ainsi de déterminer le point de puissance maximale (MPP) du module. La puissance de pointe ( $P_{max}$ ) correspond à la puissance maximale que le module peut produire sous des conditions standard (irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$ , température de  $25 \text{ °C}$ ) et est généralement exprimée en watts-crête ( $W_c$ ). Enfin, le rendement d'un module, qui est le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire reçue, peut atteindre jusqu'à 22 % ou plus pour les modules monocristallins, tandis qu'il se situe généralement entre 15 % et 20 % pour les modules polycristallins.



**Figure II-6 :** Courbe caractéristique du courant en fonction de la tension avec différentes températures (a) et (b) avec différentes irradiances



**Figure II-7 :** Courbe caractéristique de la puissance avec différentes températures (a) et (b) courbe de la puissance avec irradiances variables



**Figure II-8 :** Courbe caractéristique de la puissance avec PSC (a) et (b) courbe de courant en PSC

### II.5 Classification et architecture des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques se divisent en trois catégories : autonomes, reliés au réseau et hybrides (comme illustré dans la Figure II-9).

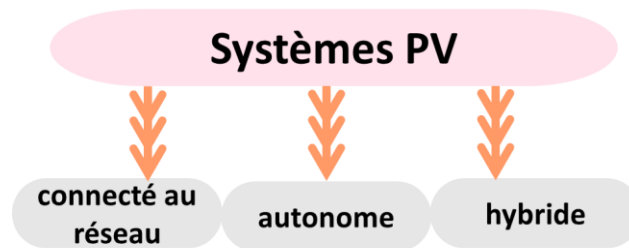


Figure II-9 : Classification du système PV

#### II.5.1 Systèmes autonomes

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont conçus pour fonctionner indépendamment du réseau électrique et sont souvent utilisés dans des zones rurales ou éloignées où l'accès à l'électricité est limité. Ils se composent de plusieurs éléments clés : les panneaux photovoltaïques qui convertissent la lumière solaire en électricité, les batteries qui stockent l'énergie produite pour une utilisation ultérieure, permettant une alimentation continue même lorsque le soleil ne brille pas, les onduleurs qui transforment le courant continu (CC) produit par les panneaux en courant alternatif (AC) utilisable par les appareils électroménagers, et enfin, les régulateurs de charge qui protègent les batteries contre la surcharge et la décharge excessive, prolongeant ainsi leur durée de vie.

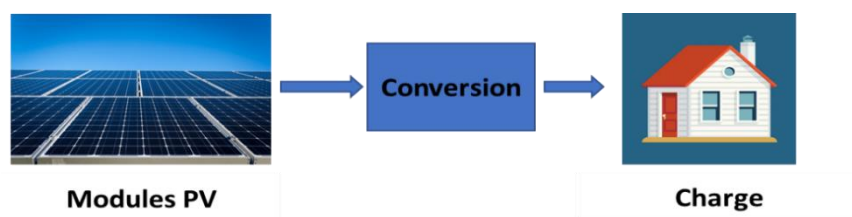


Figure II-10 : Système photovoltaïque autonome

### II.5.2 Systèmes connectés au réseau

Ces systèmes photovoltaïques connectés au réseau permettent aux utilisateurs de vendre l'excès d'énergie produite ou d'acheter de l'énergie lorsque la production est insuffisante. Ils comprennent plusieurs composants clés : les panneaux photovoltaïques, similaires à ceux des systèmes autonomes, les onduleurs, qui sont essentiels pour synchroniser la production d'énergie avec le réseau, les compteurs bidirectionnels, qui mesurent l'énergie consommée et celle injectée dans le réseau, permettant un suivi précis de la consommation et de la production, et enfin, les systèmes de gestion de l'énergie, qui optimisent la consommation en fonction de la production et des besoins.

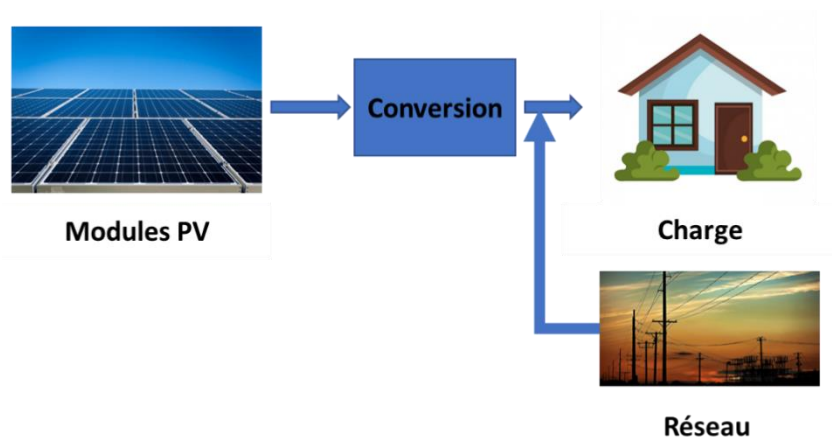


Figure II-11 : Système photovoltaïque connecté au réseau

### II.5.3 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides photovoltaïques combinent plusieurs sources d'énergie, telles que le solaire, le diesel ou l'éolien, afin d'assurer une alimentation électrique continue et fiable. Ce type de système est particulièrement adapté aux zones isolées ou aux sites où l'ensoleillement seul ne suffit pas à couvrir les besoins énergétiques. L'énergie solaire peut être utilisée en priorité, tandis que les générateurs diesel ou les éoliennes prennent le relais en cas de faible production ou de forte demande. Cette complémentarité permet d'optimiser le rendement global, de réduire la dépendance aux carburants fossiles, et d'améliorer la stabilité du système électrique.

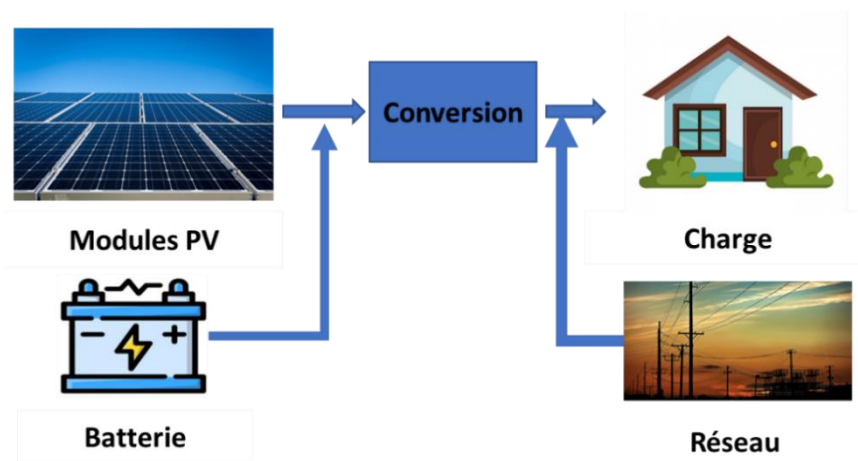


Figure II-12 : Systèmes photovoltaïque hybrides

### II.6 Applications des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques ont une large gamme d'applications qui vont au-delà de la simple production d'électricité pour les foyers.

#### II.6.1 Applications résidentielles

Les panneaux solaires installés sur les toits permettent aux propriétaires de produire leur propre électricité, réduisant ainsi leur dépendance aux réseaux électriques traditionnels.

#### II.6.2 Applications commerciales et industrielles

Les entreprises utilisent des systèmes PV pour diminuer leurs coûts énergétiques et atteindre des objectifs de durabilité. Les grands parcs solaires contribuent également à la production d'énergie à grande échelle.

#### II.6.3 Systèmes isolés

Dans les zones éloignées où l'accès au réseau électrique est limité, les systèmes photovoltaïques peuvent fournir une source d'énergie fiable pour l'éclairage, la communication et d'autres besoins essentiels.

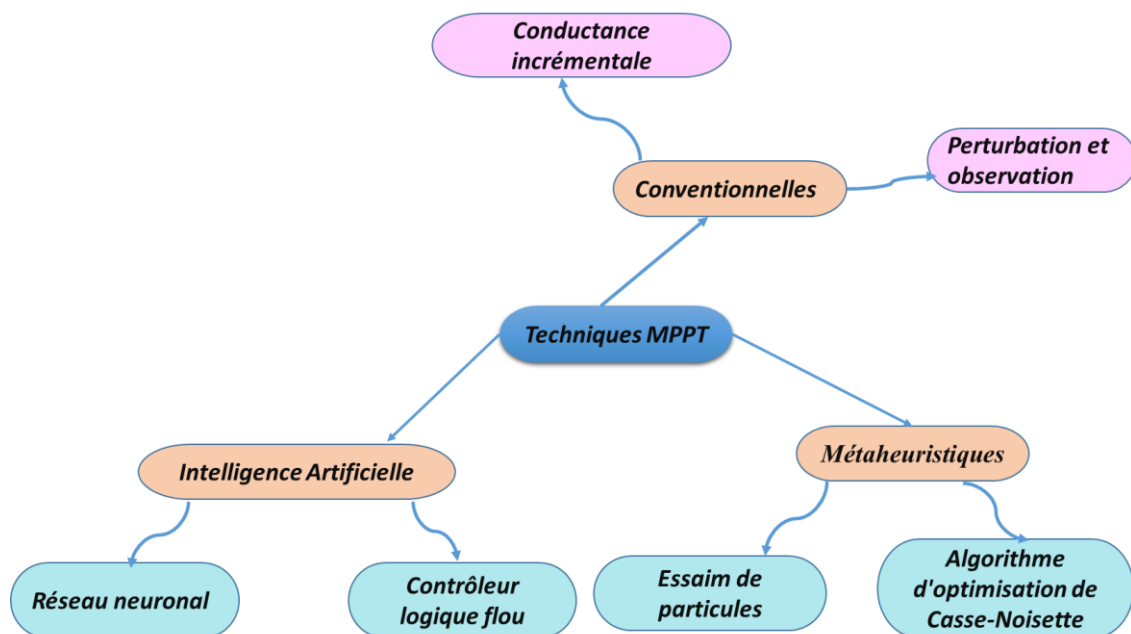
#### II.6.4 Intégration dans les réseaux électriques

Les systèmes PV peuvent être intégrés dans les réseaux électriques existants pour fournir une énergie renouvelable supplémentaire, contribuant ainsi à la transition énergétique vers des sources plus durables.

**II.7 Techniques d’optimisation du point de puissance maximale (MPPT)**

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est une méthode de contrôle avancée largement utilisée dans les systèmes d’énergie renouvelable, en particulier dans les applications photovoltaïques et éoliennes, afin d’optimiser l’extraction d’énergie dans des conditions environnementales fluctuantes[82]. Cette technologie sophistiquée fonctionne comme un système intelligent qui vérifie et modifie en permanence les paramètres opérationnels afin de garantir une production d’énergie optimale à partir de sources d’énergie renouvelables. Le principe de base du MPPT est que les sources d’énergie renouvelables, en particulier les panneaux solaires, présentent des caractéristiques courant-tension (I-V) non linéaires, le point de puissance maximale (MPP) fluctuant en réponse aux variations des conditions environnementales telles que l’irradiation solaire, la température et les modèles d’ombrage. Le contrôleur MPPT utilise divers algorithmes et stratégies de contrôle pour identifier et maintenir le fonctionnement au point idéal. Cet algorithme permet d’identifier avec précision le point de fonctionnement optimal nécessaire à la gestion de la charge en surveillant des paramètres critiques tels que l’irradiation solaire et la température.

Une multitude d’algorithmes et de conceptions MPPT ont été récemment présentés dans la littérature. Cette étude classe les méthodes MPPT en fonction de divers paramètres, notamment la technologie de suivi et la détection, entre autres. La classification recommandée a été adoptée dans ce travail. La figure II-13 illustre le cadre général des différentes approches.



**Figure II-13 : MPPT Classification**

Les différentes techniques MPPT peuvent être classées grossièrement en fonction de leurs concepts et procédures de fonctionnement. Les méthodes classiques englobent des techniques établies telles que Perturbation et Observation (P&O), qui modifie le point de fonctionnement en perturbant la tension ou le courant et en surveillant la variation de la puissance de sortie qui en résulte ; Conductance Incrémentale (IC), qui calcule la dérivée de la puissance concernant la tension pour identifier le point de puissance maximale (MPP) .Les méthodes intelligentes utilisent des algorithmes sophistiqués et l'intelligence artificielle, tels que les réseaux neuronaux qui analysent les données passées et les entrées en temps réel pour prévoir le MPP, et la logique floue qui applique la théorie des ensembles flous pour émettre des jugements sur la base d'entrées ambiguës. Les méthodes d'optimisation mettent l'accent sur des procédures mathématiques telles que les procédures génétiques et l'optimisation par essaims de particules (PSO). Chaque méthodologie MPPT possède des avantages et des inconvénients distincts, ce qui oblige les ingénieurs à choisir une méthode appropriée en fonction des besoins de l'application, des variables environnementales et de la complexité du système.

### II.7.1 Algorithmes MPPT conventionnels

Diverses stratégies MPPT conventionnelles ont été utilisées pour rechercher le MPP existant dans des conditions d'irradiation uniforme. Conditions d'irradiation uniformes. Dans ce cas, les techniques les plus utilisées :

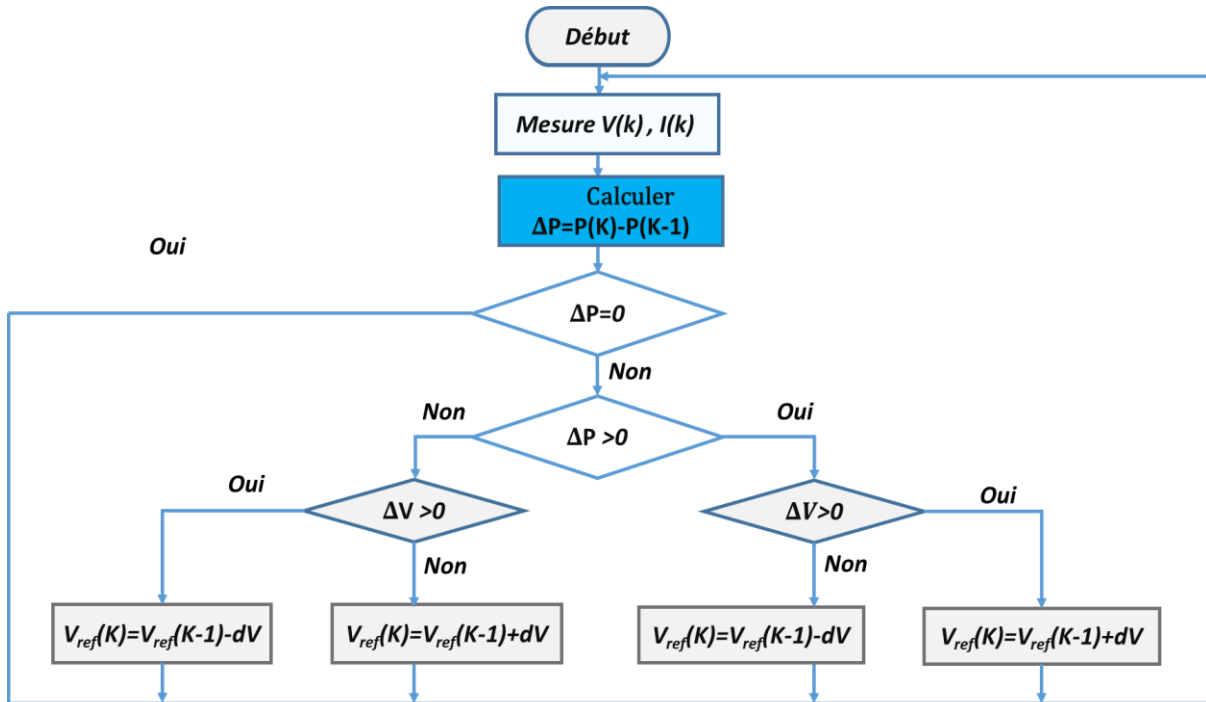
#### II.7.1.1 Technique Perturbation & Observation (P&O)

Cette méthode est basée sur la perturbation d'une variable de contrôle par de petites variations et sur l'observation de la réponse de la fonction cible jusqu'à ce que la pente devienne nulle. L'observation de la réponse résultante de la fonction cible jusqu'à ce que la pente devienne nulle. Le processus de fonctionnement de la méthode de perturbation et d'observation illustre le mouvement du point de fonctionnement en régime permanent du système. Le point de fonctionnement en régime permanent du système ; la taille du pas de perturbation et la taille du pas de temps d'observation sont les paramètres pris en compte. Le pas de perturbation et le pas de temps d'observation sont les paramètres considérés à ajuster [83].

La puissance de sortie du générateur est surveillée et la tension d'entrée de l'onduleur ou l'un des paramètres de l'onduleur est modifié. La puissance de sortie du générateur est surveillée et la tension d'entrée de l'onduleur ou l'une des variables du convertisseur sont perturbées, telles que le rapport cyclique ; le courant d'entrée ou la tension d'entrée. La condition à vérifier à la puissance maximale est donnée comme suit :

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} = 0 \tag{II-1}$$

Où  $V_{pv}$  et  $P_{pv}$  sont respectivement la tension et la puissance du module PV. L'organigramme de perturbation et d'observation est illustré à la figure.



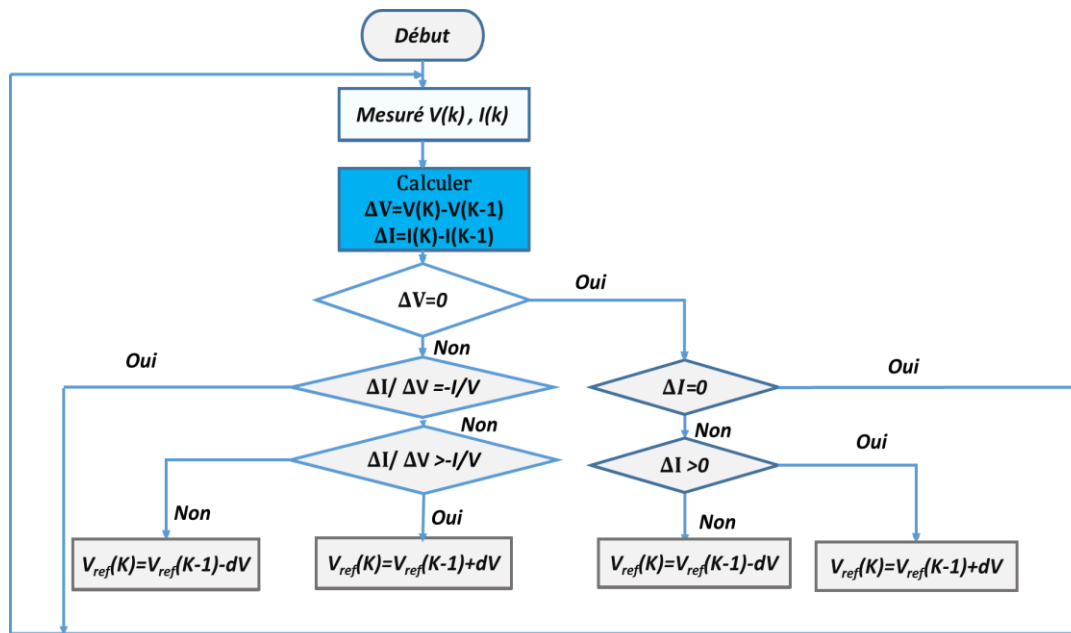
**Figure II-14:** Organigramme de la méthode P&O

**II.7.1.2 Conductance incrémentale (IC)**

Cette technique a été découverte pour la première fois en 1983. La version finale de l'organigramme de calcul classique de la conductance incrémentale a été présentée en 1995. Dans cette technique, le contrôleur mesure les variations incrémentales du courant et de la tension du générateur photovoltaïque afin de pouvoir prédire l'effet d'une variation de tension. Cette technique nécessite un temps de calcul supplémentaire dans le contrôleur, mais elle permet de suivre des conditions changeantes plus rapidement par rapport à la méthode de perturbation et d'observation (P&O). Elle est similaire à l'algorithme P&O dans la mesure où elle peut générer des oscillations en régime permanent dans la puissance produite. La condition à vérifier à la puissance maximale est donnée comme suit [84] :

$$\frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} = 0 \tag{II-2}$$

Où  $I$  est le courant du générateur photovoltaïque. L'organigramme de la conductance incrémentale est donné dans la figure suivante :



**Figure II-15:** Organigramme de la méthode INC

### II.7.2 Techniques MPPT basées sur l'intelligence artificielle (IA)

L'informatique douce est une approche utilisée pour construire des systèmes informatiques intelligents, elle englobe un groupe de méthodologies uniques qui fournissent des caractéristiques de traitement de l'information flexibles capables de résoudre des problèmes d'optimisation complexes[85], comme le montre la figure.

#### II.7.2.1 Contrôle par logique floue (FLC)

La logique floue a été utilisée pour la première fois en 1970 pour l'aide à la décision en médecine, et la régulation floue des chaudières à vapeur en 1975 par Mamdani. Le traitement de l'incertitude a été initié par la théorie des ensembles flous, ce qui a permis une formalisation avancée des systèmes d'information. Elle a également un impact considérable sur les techniques modernes de classification automatique et sur le renouvellement de certains systèmes d'aide à la décision. et le renouvellement de certaines approches d'aide à la décision [86].

Les mots de la langue courante sont utilisés dans la logique floue comme valeurs de vérité. C'est pour cette raison que la logique floue est appelée logique linguistique, dans laquelle on trouve une combinaison de traitement de données symboliques et numériques. Peut être trouvée.

Le diagnostic intelligent peut être conçu à l'aide de méthodes fondées sur la logique floue et basées sur des connaissances exprimées en langage naturel. Exprimées en langage naturel. Il s'agit également d'un raisonnement humain, et non de calculs rigides modélisés et non des calculs rigides modélisés. Elle se caractérise par un mode de raisonnement plus intuitif que la logique conventionnelle. Logique conventionnelle. L'utilisation de règles ensemblistes et de fonctions d'appartenance appelées « ensembles flous » permet aux utilisateurs de mieux comprendre les phénomènes physiques, difficiles et imprécis à modéliser autrement.

Les systèmes de contrôle industriels utilisent fréquemment la logique floue. La loi de commande qui en résulte est souvent efficace et ne nécessite pas de développements théoriques importants. La structure du contrôle basé sur la logique floue est illustrée à la Figure II-16.

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{II-3})$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{II-4})$$

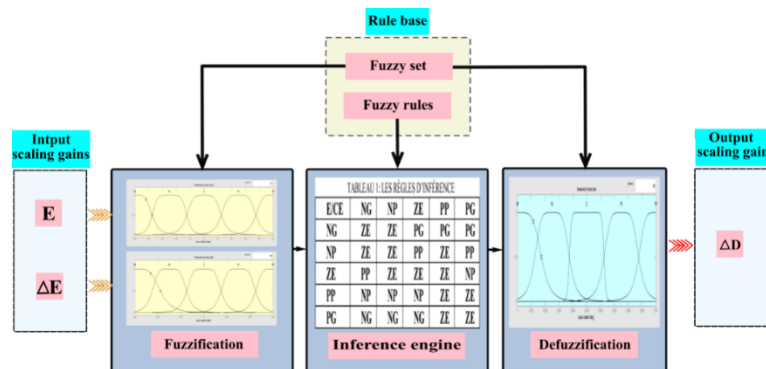


Figure II-16: FLC structure.

### II.7.2.2 Réseaux de neurones artificiels (ANN)

Les réseaux neuronaux artificiels sont composés d'éléments simples (généralement adaptatifs) massivement connectés en parallèle avec une organisation hiérarchique. Ils tentent d'imiter les systèmes nerveux biologiques dans leur interaction avec les objets du monde réel. En outre, l'ANN exécute la fonction algébrique de ses entrées. L'ANN peut être modélisé à l'aide d'un graphe orienté et en utilisant des connexions pour l'interconnexion des neurones et l'échange d'informations. Le calcul sera effectué dans une approche coopérative, parallèle et distribuée et dans une approche de type « réseau » [87].

Le réseau neuronal est essentiellement caractérisé par sa topologie qui consiste dans le choix de la fonction de transfert et des modes d'apprentissage, et dans le choix de l'algorithme d'apprentissage. De la fonction de transfert, des modes d'apprentissage et du type d'interconnexion. Les neurones qui construisent le réseau caractérisent la structure du modèle, une représentation distribuée dans laquelle chaque neurone contribue. Ils peuvent être utilisés dans les problèmes de supervision d'équipements industriels. Les propriétés de tolérance aux pannes des réseaux neuronaux sont définies par leur capacité à maintenir leur capacité de traitement en présence d'un endommagement du réseau et d'exécuter les tâches assignées en présence d'informations erronées. La structure d'un ANN est illustrée dans la Figure II-17.

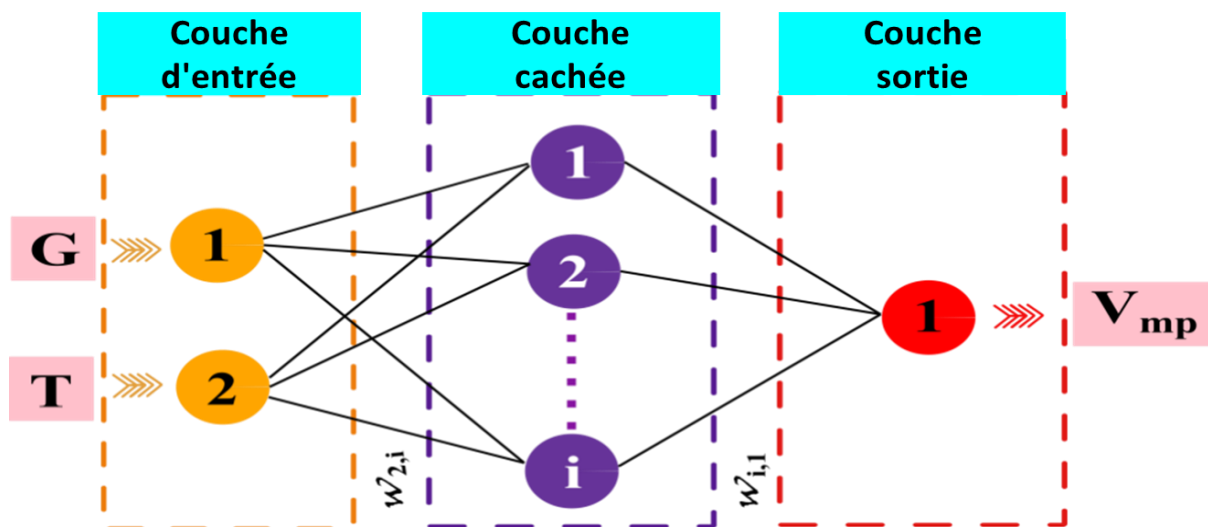


Figure II-17: ANN structure

### II.7.3 Techniques MPPT métaheuristique

#### II.7.3.1 Optimisation par essais de particules (PSO)

Le PSO est une méthode de la grande famille de l'intelligence en essaim qui imite le comportement social et la collaboration entre des individus souvent appelés particules. L'analyse de l'environnement et du voisinage décrit le comportement social et constitue donc une méthode de recherche optimale en analysant les tendances des articles voisins. Chaque particule a pour objectif d'optimiser ses chances en suivant la tendance de son voisinage, qu'elle modère par sa propre expérience. L'algorithme est généralement initialisé de manière aléatoire et les solutions possibles sont positionnées de manière aléatoire dans l'espace de recherche de la fonction objective. Le concept central de PSO est que les particules accélèrent dans la direction des meilleures solutions [88]. Elles évaluent itérativement l'adéquation des solutions candidates et disposent d'un historique de leur meilleure valeur d'aptitude. Chaque particule à

la propriété de communiquer avec les particules qui l'entourent et garde en mémoire la solution qu'elle a visitée le plus souvent. Les particules se déplacent à chaque itération en tenant compte de leur meilleure position et de celle de leurs voisins. L'objectif est de modifier leur trajectoire de manière à ce qu'elles convergent vers l'optimum.

Les processus d'intelligence et de mouvement dans un système dynamique aboutissent à un point de fonctionnement optimal. Le PSO privilégie la coopération par rapport à la concurrence et sans sélection. Une particule dont les performances sont médiocres à une itération donnée est conservée au cas où elle trouverait la meilleure solution. D'après certains résultats de la littérature, cette technique ne présente pas les problèmes que l'on retrouve dans d'autres techniques évolutionnaires. Que l'on retrouve dans d'autres techniques évolutionnaires. L'organigramme de PSO est présenté à la figure suivante :

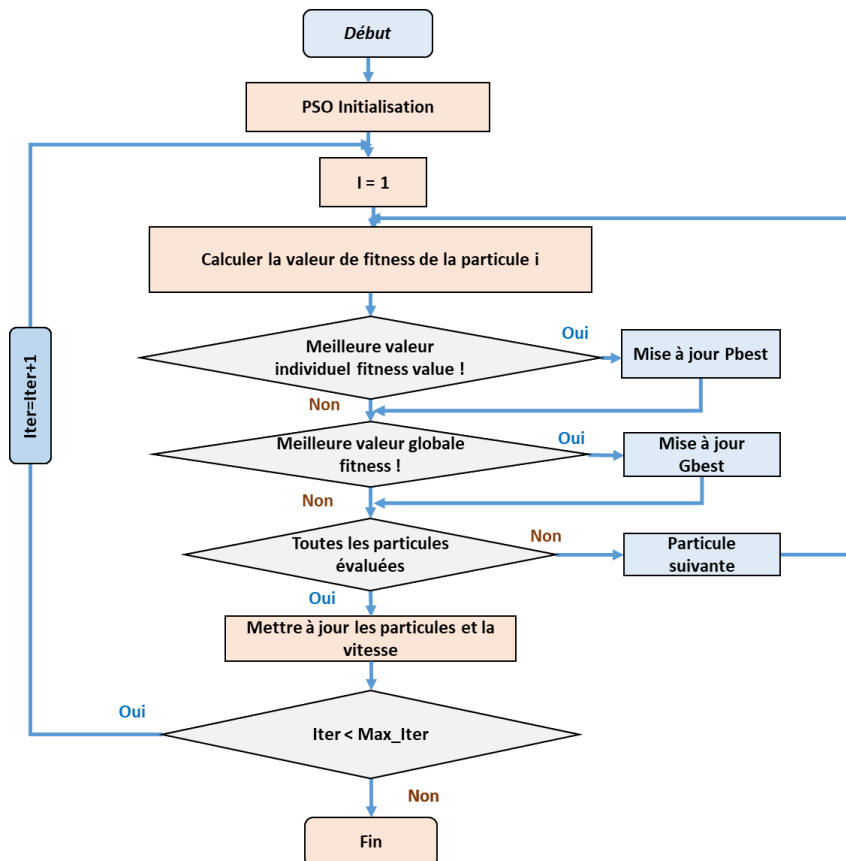


Figure II-18:PSO structure

### II.7.3.2 NOA optimisation algorithmme

L'algorithme d'optimisation du Casse-Noisette (NOA) est une approche métaheuristique innovante, inspirée des comportements naturels du casse-noisette de Clark. En reproduisant les stratégies de recherche, de stockage et de récupération de nourriture de cet oiseau, le NOA

équilibre efficacement les phases d'exploration et d'exploitation au cours du processus d'optimisation. Des études ont démontré que le NOA surpasse plusieurs algorithmes d'optimisation de pointe en termes de vitesse de convergence et de qualité des solutions, notamment dans des contextes complexes [89][90]. Ces aspects seront explorés en détail dans le chapitre 4.

### II.8 Dimensionnement et optimisation des systèmes photovoltaïques

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est une étape décisive qui nécessite une méthodologie rigoureuse intégrant l'analyse précise des besoins énergétiques (consommations journalières, mensuelles et annuelles, pointes de demande), l'évaluation minutieuse du potentiel solaire du site (données d'irradiation locale, orientation et inclinaison optimales, identification des ombrages), la sélection judicieuse des composants (panneaux photovoltaïques en fonction de leur puissance crête et de leur technologie, onduleurs adaptés, systèmes de stockage dimensionnés pour des installations autonomes, câblage et protections appropriés), tout en respectant les contraintes réglementaires de raccordement pour les systèmes raccordés au réseau ou en assurant un surdimensionnement adéquat pour garantir l'autonomie des systèmes isolés, le tout complété par une analyse technico-économique optimisant le retour sur investissement en considérant les coûts d'installation, de maintenance, la durée de vie des équipements et les mécanismes de support disponibles, un processus désormais facilité par des logiciels spécialisés tels que PVSyst, HOMER qui intègrent ces multiples paramètres pour proposer des solutions fiables et performantes.

### II.9 Conclusion

La modélisation et la simulation des systèmes photovoltaïques jouent un rôle essentiel dans la compréhension, l'optimisation et le déploiement efficace de l'énergie solaire. Ce chapitre a permis de mettre en lumière les principes physiques sous-jacents, la composition détaillée des systèmes PV, ainsi que les différentes architectures possibles (autonomes, connectées ou hybrides), tout en soulignant l'influence déterminante des conditions environnementales sur leurs performances. Les principaux paramètres, tels que l'irradiance, la température et les caractéristiques électriques des modules, ont été analysés en profondeur, en mettant en évidence l'importance des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT), comme la perturbation & *observation* ou conductance incrémentale, pour maximiser l'extraction d'énergie dans des conditions variables. L'intégration du stockage, de l'électronique de puissance et de dispositifs de contrôle intelligents contribue également à

améliorer l'efficacité et la fiabilité des installations, notamment dans des contextes spécifiques comme celui de l'Algérie. Toutefois, la performance globale reste fortement dépendante de l'architecture de conversion reliant les modules PV à la charge ou au réseau. Dans cette optique, le chapitre suivant introduit le convertisseur **quasi-Z-source**, une topologie innovante offrant une meilleure flexibilité en tension, une continuité de courant côté source, et une compatibilité accrue avec les techniques MPPT, ouvrant ainsi la voie à des systèmes photovoltaïques plus performants, robustes et adaptés aux exigences modernes.

### CHAPITRE III Optimisation d'adaptateur de charge pour système PV

#### III.1 INTRODUCTION

L'onduleur est un composant essentiel de la chaîne de conversion photovoltaïque (PV), facilitant la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique utilisable. Différentes topologies d'onduleurs ont été développées pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la conformité aux normes du réseau. La littérature met en évidence plusieurs types d'onduleurs clés et leurs avantages respectifs, essentiels à l'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques[91]. Les onduleurs raccordés au réseau sont conçus pour se connecter directement au réseau électrique. Les onduleurs à source de courant (CSI) sont reconnus pour leur intégration stable au réseau et sont classés en architectures à deux, trois et plusieurs niveaux[92]. Parallèlement, les onduleurs multi-niveaux sont connus pour réduire la distorsion harmonique totale et améliorer la qualité de l'énergie, ce qui les rend particulièrement adaptés aux systèmes photovoltaïques de grande capacité [93].

L'utilisation des onduleurs Z-source (ZSI) représente une avancée significative dans le domaine de la conversion d'énergie, surmontant efficacement les limitations inhérentes aux onduleurs traditionnels à source de tension et de courant, particulièrement dans les applications d'énergie renouvelable comme les systèmes photovoltaïques. Contrairement aux configurations conventionnelles, les ZSI possèdent la capacité intrinsèque d'élévation de tension tout en maintenant une conception compacte, éliminant ainsi le besoin de convertisseurs élévateurs CC-CC supplémentaires. Cette caractéristique réduit considérablement la complexité du système, les coûts associés et les pertes énergétiques, tout en optimisant l'efficacité globale[94].

Les onduleurs Z-source se distinguent également par leur fiabilité et robustesse supérieures, offrant une gestion efficace des variations de tension et des défauts de transition sans nécessiter de circuits de protection additionnels. Leur architecture unique, basée sur un réseau d'impédance spécifique, permet un flux de puissance bidirectionnel, facilitant ainsi l'intégration des systèmes de stockage d'énergie et améliorant la flexibilité opérationnelle des systèmes de conversion modernes.

Ces avantages fondamentaux positionnent les ZSI comme une solution optimisée pour la gestion énergétique durable, intégrant en un seul étage la conversion d'énergie et la fonction de

contrôle MPPT (Suivi du point de puissance maximale), ce qui contribue à minimiser les pertes et à renforcer la fiabilité dans les applications photovoltaïques et autres systèmes d'énergie renouvelable[95].

Les approches de commande du ZSI conventionnelle, telles que la Commande de suralimentation simple (SBC), Commande de suralimentation maximale (MBC) et Commande de suralimentation maximale constante (MCBC), visent à optimiser le rapport cyclique et la tension de sortie. L'onduleur quasi-Z (qZSI), contrôlé par la modulation SVPWM, offre un meilleur rendement [96], un contrôle précis de la fréquence et de la tension, et une réduction des harmoniques. L'approche directe du rapport cyclique permet une régulation indépendante de la tension et du courant, supprimant le besoin d'une boucle de contrôle intermédiaire.

Ce chapitre propose une approche d'optimisation multi-objectifs combinant MPPT et contrôle direct du cycle de service pour améliorer l'efficacité et la performance des systèmes photovoltaïques. Cette méthodologie contribue à l'avancement de la conversion d'énergie solaire, facilitant ainsi l'intégration des énergies renouvelables pour un avenir durable.

### III.2 Modélisation d'un GPV

On peut modéliser les panneaux par une source de courant en parallèle avec une diode, représentant le comportement des cellules photovoltaïques, et inclure des résistances série et shunt pour refléter les pertes et imperfections du système. Cette modélisation permet de simuler avec précision la production d'énergie en fonction des conditions environnementales Comme le montre la Figure III-1.

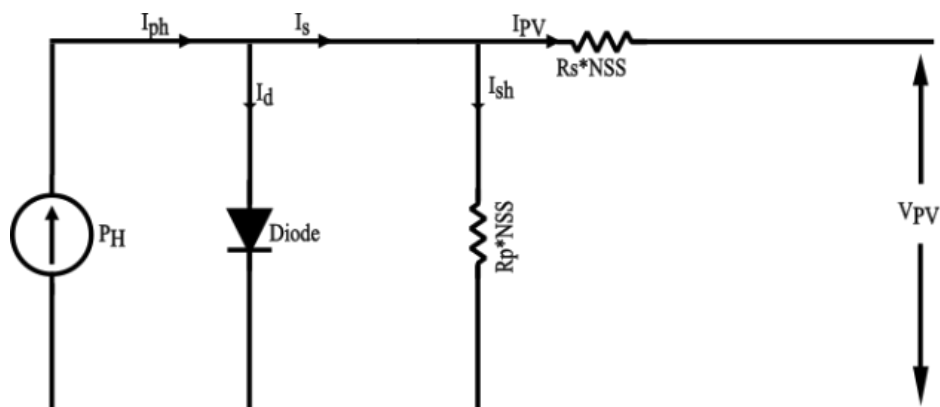


Figure III-1: Modèle Simulink de cellule PV

Le courant de sortie du générateur photovoltaïque est donné par les équations suivantes :

$$I_{pv} = I_s - I_{sh} \quad (III-1)$$

$$I_s = I_{ph} - I_d \quad (III-2)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s N_{ss}}{R_p N_{ss}} \quad (III-3)$$

$$I_{ph} = I_{ph,n} + K_I \Delta T \frac{G}{G_n} \quad (III-4)$$

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s N_{ss}}{a V_t N_{ss}}} - 1 \right) \quad (III-5)$$

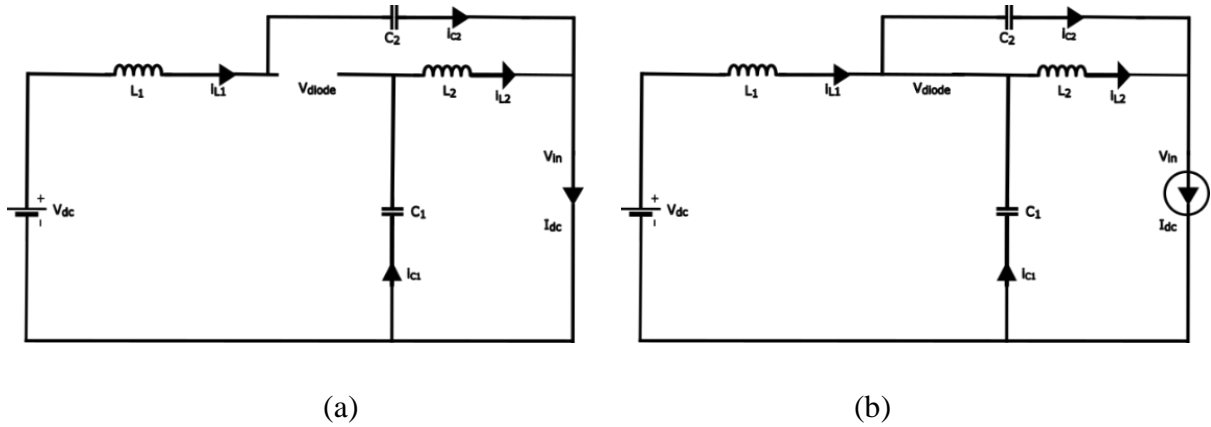
Où  $N_{ss}$  est le nombre de panneaux connectés en série,  $R_s$  est la résistance série du panneau PV, et  $R_p$  est la résistance parallèle. La température  $T$  et l'irradiation  $G$  déterminent le photo courant  $I_{ph}$ . Le courant nominal généré, noté  $I_{ph,n}$ , est déterminé à STC avec  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $G = 1\,000 \text{ W/m}^2$ . Le coefficient de courant de court-circuit/température, noté  $K_I$ , est égal à  $\Delta T = T - T_n$ , où  $T$  et  $T_n$  sont respectivement la température actuelle et la température nominale.  $G$  et  $G_n$  sont l'irradiation actuelle et nominale.  $I_d$  est le courant dans lequel  $V_t$  est la tension thermique du générateur PV, tandis que  $I_0$  représente le courant qui s'oppose à la saturation.

### III.3 Fonctionnement du qZSI

Un onduleur de puissance appelé onduleur à source quasi-Z (qZSI) est une variante de la source Z traditionnelle qui utilise un réseau condensateur-inducteur pour relier un module solaire à l'onduleur. Deux inducteurs et deux condensateurs reliés dans une topologie quasi-Z constituent les onduleurs à source quasi-Z, qui contournent les problèmes de limitation de tension qui affectent les topologies VSI et CSI traditionnelles. Dans un seul étage de conversion de puissance, les qZSI peuvent augmenter ou diminuer la tension de sortie AC par rapport à leur tension d'entrée DC en utilisant leurs capacités Buck/Boost. Le qZSI est un bon choix en raison de sa capacité à acheter ou à augmenter la tension continue, ainsi que de sa grande immunité à l'énergie et aux courts-circuits. Le contrôle du cycle d'injection permet au qZSI de suivre le point de puissance maximale.

Le fonctionnement du qZSI comprend un état ST supplémentaire pour augmenter la tension du bus CC, en plus des deux états actifs et des six états passifs typiques des huit états de commutation des convertisseurs traditionnels. Avec six vecteurs actifs et deux vecteurs zéro.

La Figure III-2 montrent la structure du qZSI et les circuits correspondants, respectivement [97][98] :



**Figure III-2:** Le circuit équivalent qZSI dans la condition ST (a) et le circuit équivalent qZSI dans la condition non ST (b)

La relation fondamentale pour QZSI[99][100]:

$$D = \frac{T_{sh}}{T_s} \quad \text{(III-6)}$$

$$T_{sh} = T_s - T_{nsh} \quad \text{III-7)}$$

Dans ce cas,  $D$  est le rapport de service ST et  $T_{nsh}$  désigne l'intervalle de temps qui n'est pas dans l'état ST,  $T_{sh}$  désigne la période de temps qui est dans l'état ST pendant un seul cycle de contrôle  $T_s$ .

À régime constant, la tension moyenne entre les condensateurs 1 et 2 peut être décrite par deux équations :

$$V_{C1} = \frac{T_{nsh}}{T_{nsh} - T_{sh}} V_{dc} = \frac{1-D}{1-2D} V_{dc} \quad \text{III-8)}$$

$$V_{C2} = \frac{T_{nsh}}{T_{nsh} - T_{sh}} V_{dc} = \frac{D}{1-2D} V_{dc} \quad \text{( III-9)}$$

La tension aux bornes du circuit intermédiaire du pont onduleur est :

$$V_{in} = V_{C1} + V_{C2} = \frac{1}{1-2D} V_{dc} = B V_{dc} \quad (\text{III-10})$$

Le pic

$$V_{ph} = \frac{1}{2} M \cdot V_{in} = \frac{1}{2} M \cdot B \cdot V_{dc} = \frac{1}{2} G_1 \cdot V_{dc} \quad (\text{III-11})$$

Où  $V_{ph}$  est la phase de crête de sortie et  $M$  est l'indice de modulation,  $G_1$  est le gain de tension et  $B$  est le facteur d'amplification.

### III.4 Méthode proposée pour la commande

L'utilisation d'un contrôle direct du rapport cyclique dans une chaîne d'alimentation basée sur un onduleur à quasi-source  $z$  alimenté par un générateur photovoltaïque (Figure III-3) présente deux avantages majeurs. Premièrement, elle minimise les oscillations en régime permanent, ce qui se traduit par une production d'énergie plus régulière. Deuxièmement, elle assure un suivi rapide du point de puissance maximale (MPP) même dans des conditions environnementales difficiles, y compris l'ombrage partiel et les fluctuations significatives de l'irradiation, d'autre part, la minimisation du nombre de convertisseurs statiques dans la chaîne de conversion augmente la fiabilité et l'efficacité globale de cette chaîne de conversion.

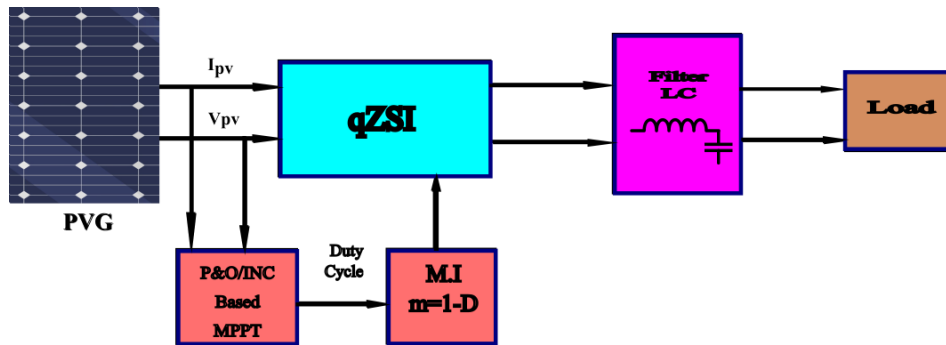


Figure III-3: Schéma du système étudié

### III.5 Commande du rapport cyclique

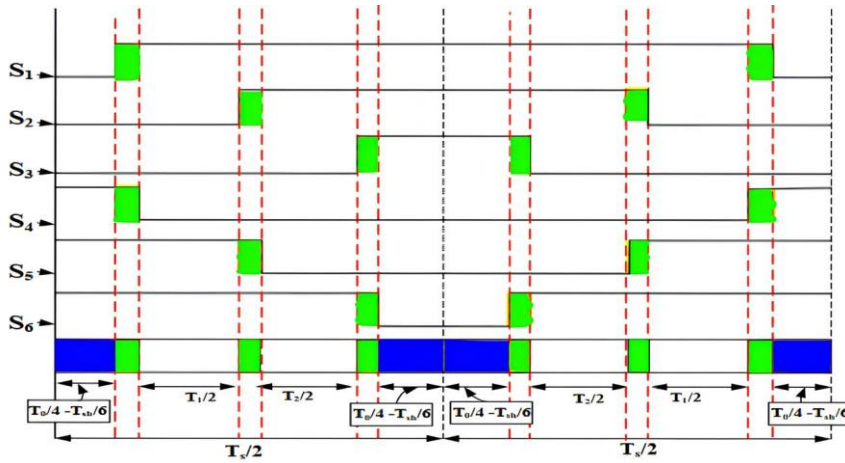
L'utilisation des mesures  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  pour anticiper le MPP en utilisant les procédures d'optimisation qui ont déjà été couvertes.

Le modèle de contrôle du rapport cyclique est défini par [101] :

$$\frac{d}{dt} [\Delta q_{dc}] = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1-D \end{bmatrix}}_{B_{1dc}} \begin{bmatrix} \Delta i_{L2} \\ \Delta v_{C1} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} V_{dc,p} \\ 1-D \end{bmatrix}}_{B_{2dc}} [\Delta d] \tag{III-12}$$

$$[\Delta d_r] = \underbrace{\begin{bmatrix} -k_p^L k_i^{dc} \end{bmatrix}}_{C_{dc}} [\Delta q_{dc}] + \underbrace{\begin{bmatrix} -k_p^L & \frac{k_p^L k_p^{dc}}{D-1} \end{bmatrix}}_{E_{1dc}} \begin{bmatrix} \Delta i_{L2} \\ \Delta v_{C1} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{k_p^L k_p^{dc}}{D-1} & V_{dc,p} \end{bmatrix}}_{E_{2dc}} [\Delta d]$$

Où  $k_p^{dc}$  et  $k_i^{dc}$  désignent respectivement les gains proportionnel et intégral du régulateur de tension continue, et  $k_p^l$  désigne le gain proportionnel du régulateur de l'inductance L2.



**Figure III-4:** Séquence de commutation pour DSVPWM dans le secteur 1

### III.6 Résultats et discussion

Le système proposé se compose d'un module photovoltaïque avec trois modules parallèles et neuf modules en série, d'un qZSI, d'un filtre LC et d'une charge résistive de 10 Ω.

Le module solaire a une puissance de sortie maximale de 200 W dans des conditions de fonctionnement standard (STC), qui impliquent une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C. Nous observons le comportement du système sous diverses conditions météorologiques, telles que la température et l'irradiation.

## CHAPITRE III Optimisation d'adaptateur de charge pour système PV

Tableau III-1: Paramètres électriques du module PV KYOCERA KC200GT

PV paramètre	Valeur
Puissance maximale (Pmax)	200.143W
Tension à Pmax (Vmp)	26.3V
Courant à Pmax (Imp)	7.61A
Tension en circuit ouvert (Voc)	32.9V
Courant de court-circuit (Icc)	8.21A

Tableau III-2: Simulation paramètres

Qzsi paramètre	Valeur
C=C1=C2	3Mf
L=L1=L2	5.37mH
Cf	110MF
Lf	0.5Mh
Resistance	10Ω

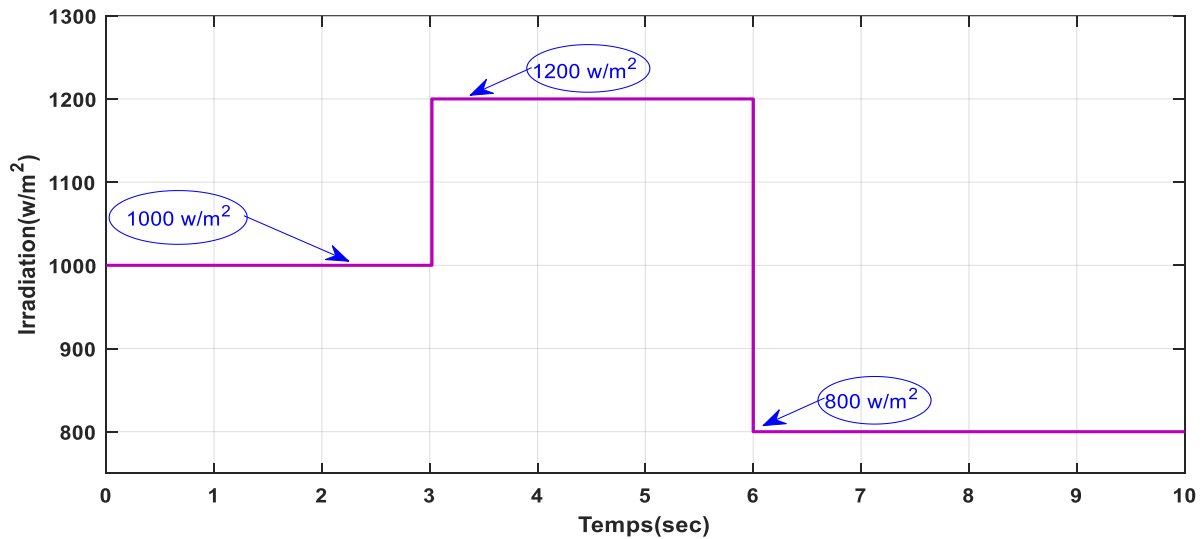
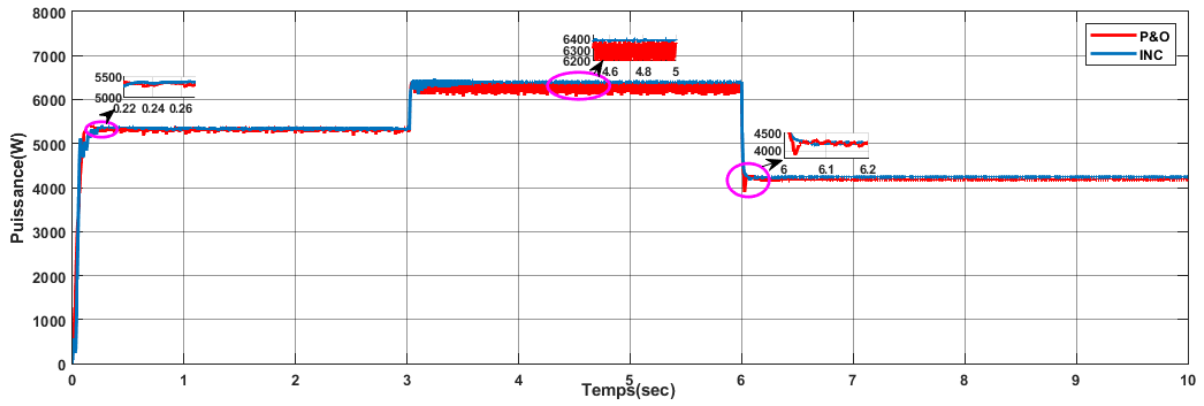
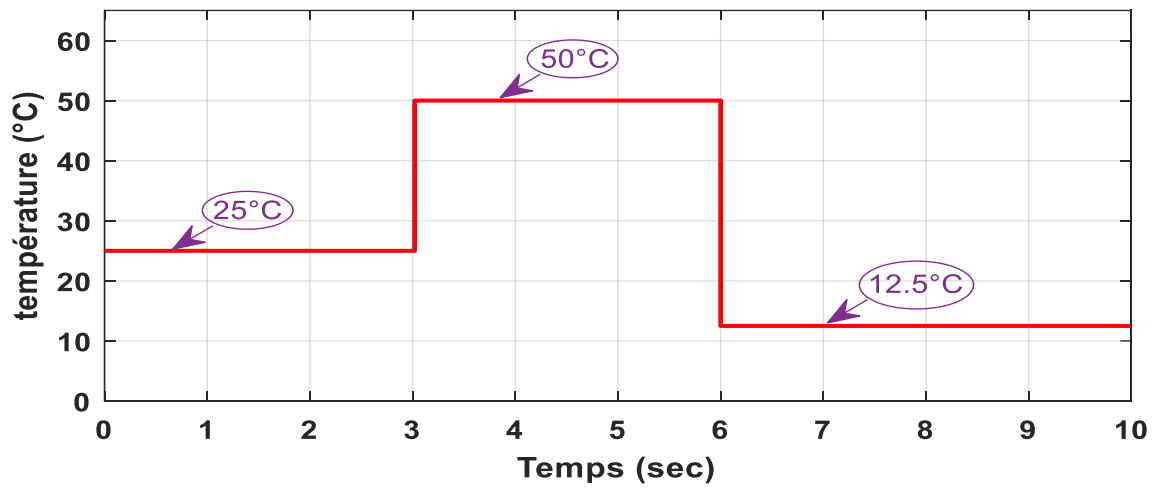


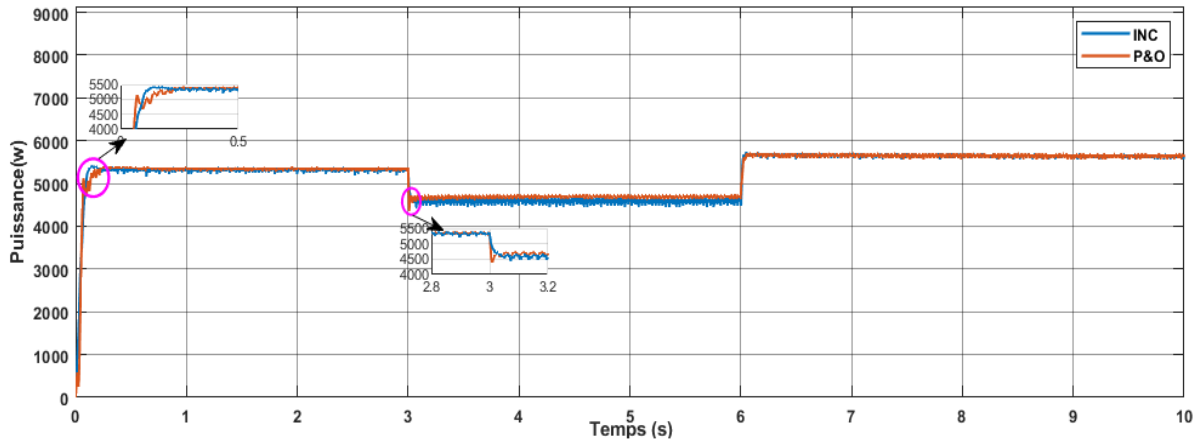
Figure III-5: Divers exemples d'irradiation solaire



**Figure III-6:**Évaluation de la puissance de sortie en comparant les algorithmes INC et P&O dans des conditions de variations d'irradiation



**Figure III-7:**Diverses instances de température



**Figure III-8:**Évaluation de la puissance de sortie en comparant les algorithmes INC et P&O dans des conditions de variations de température

Les Figure III-5 et Figure III-7 illustrent les scénarios de changement climatique en termes d'irradiation et de température, respectivement. Le Tableau III-1 et Tableau III-2 présentent les paramètres du module photovoltaïque et les paramètres du système de simulation qZSI, respectivement. Les performances du DSVPWM proposé ont été évaluées en employant deux algorithmes (INC et P&O) sous des température/irradiation variables.

Les courbes des Figure III-6 et Figure III-8 montrent que la puissance maximale de l'algorithme INC se stabilise à 0,16 s vs 0,21 s en utilisant l'algorithme P&O. Cela valide la rapidité de l'INC par rapport à P&O, avec une différence de 0,05 s. En outre, l'algorithme INC a démontré un niveau plus élevé de stabilité et une fluctuation réduite par rapport à l'algorithme P&O, ce qui se traduit par une puissance de sortie plus cohérente au fil du temps.

Les Figure III-6 et Figure III-8 montrent que l'algorithme INC est plus précis que la méthode P&O dans le suivi du MPP, ce qui améliore la stabilité du système et la réponse temporelle. En revanche, il est évident que la puissance et le coefficient de variation présentent une trajectoire ascendante avec l'augmentation de l'irradiation. Inversement, avec la température, la puissance montre une tendance à la hausse lorsque la température diminue.

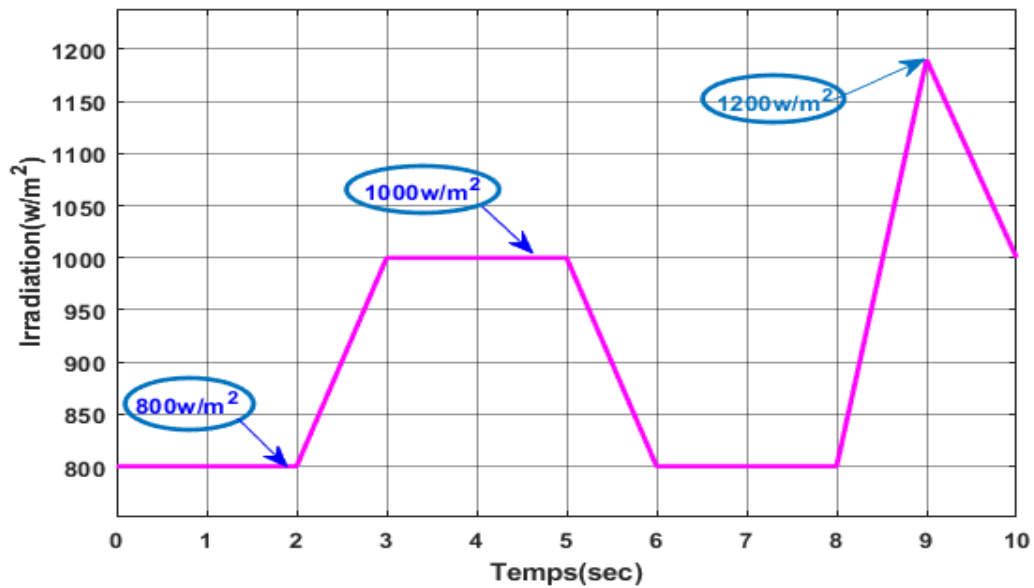


Figure III-9:Deuxième scénario de variation de l'irradiation

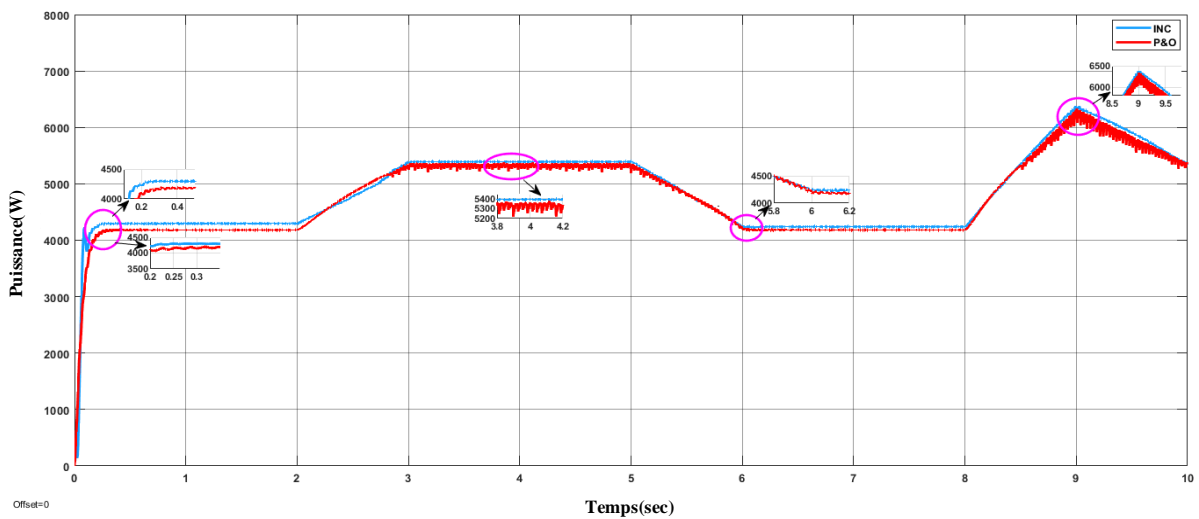


Figure III-10:Réponse de l'algorithme INC-P&O à un changement rapide d'irradiance.

Les résultats de la simulation montrent (Figure III-10) que l'algorithme incrémental MPPT est plus stable et plus rapide dans ces conditions. L'algorithme incrémental MPPT fait également preuve d'une stabilité remarquable par rapport à l'algorithme P&O, qui présente des oscillations significatives autour du point de puissance maximale dans des conditions stables.

### III.7 CONCLUSION

Ce chapitre a introduit une stratégie de commande pour les onduleurs à source quasi-Z (qZSI), reposant sur le contrôle direct du cycle de service (DSVPWM), combiné à la modulation vectorielle par largeur d'impulsion (SVPWM). Cette approche fusionne les fonctions de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et de modulation pour générer directement le rapport cyclique, supprimant ainsi la nécessité d'un régulateur PI classique. Une comparaison approfondie a été menée entre les algorithmes MPPT les plus courants, Conductance incrémentale (INC) et Perturbation & Observation (P&O), mettant en évidence la supériorité de l'algorithme INC en termes de stabilité et de rapidité face aux fluctuations d'ensoleillement.

Les résultats démontrent que l'intégration du DSVPWM dans la commande du qZSI permet une conversion d'énergie plus réactive et plus efficace, tout en renforçant la fiabilité globale du système. Cette avancée constitue un pas important vers des solutions plus robustes pour l'intégration des énergies renouvelables. Des perspectives prometteuses s'ouvrent pour l'adaptation de cette technique à d'autres architectures et sources d'énergie alternatives.

Forte de ces avancées en commande des convertisseurs, la réflexion se porte désormais sur un enjeu essentiel pour les applications concrètes, l'optimisation énergétique des stations de pompage alimentées par l'énergie solaire photovoltaïque. Le chapitre suivant se consacre ainsi à l'analyse, la modélisation et l'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque, en s'appuyant sur des algorithmes métaheuristiques avancés et des architectures intelligentes à double étage pour maximiser le rendement global, garantir la continuité de service et assurer un pompage fiable dans des contextes climatiques variables et isolé.

### CHAPITRE IV Optimisation de système de pompage photovoltaïque par NOA MPPT

#### IV.1 Introduction :

L'intégration de l'énergie PV dans le mix énergétique soulève des défis techniques majeurs, notamment les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui jouent un rôle essentiel, surtout face aux variations d'ensoleillement et de température [102][103].

Les avancées récentes ont permis de dépasser les limites des méthodes MPPT classiques, particulièrement dans des situations complexes comme l'ombrage partiel ou les conditions climatiques fluctuantes[104][105]. L'introduction de l'intelligence artificielle, des algorithmes métaheuristiques et des approches hybrides a marqué un tournant, offrant une meilleure vitesse de convergence, une plus grande précision de suivi et une adaptabilité renforcée [106][107].

Parmi ces approches innovantes, la stratégie de recherche limitée avancée (ALSS) se distingue. Elle améliore l'exploration de l'espace de recherche dans les algorithmes métaheuristiques, optimisant ainsi le suivi du MPP dans des conditions environnementales dynamiques [108][109].

En parallèle, les approches hybrides combinant IA et méthodes traditionnelles font l'objet d'une attention particulière, car elles offrent un bon compromis entre performance et complexité [110][20] malgré le besoin d'une capacité de calcul important, ces techniques assurent un suivi rapide, stable et efficace, renforçant ainsi la performance globale des systèmes PV.

Les systèmes solaires photovoltaïques (PV), notamment ceux utilisés pour le pompage solaire de l'eau, sont de plus en plus répandus pour leur potentiel à répondre à divers besoins énergétiques de manière écologiquement durable[111]. Cependant, l'efficacité de ces systèmes dépend fortement de leur capacité à s'adapter à des conditions environnementales variables [112], [113], telles que les variations d'irradiation (ombrage partiel), de température, les méthodes MPPT classiques sont lentes face à la nature dynamique et complexe de ces conditions externes. De plus, les composants d'un système de pompage solaire tels que les panneaux photovoltaïques, les convertisseurs (CC/AC ; CC/CC) les pompes, introduisent des

niveaux de complexité supplémentaires, exigeant donc des stratégies d'optimisation plus sophistiquées pour garantir des performances et une utilisation énergétique optimales.

Ce chapitre vise à introduire et utiliser un nouvel algorithme métaheuristique, le NOA, pour optimiser le système de pompage solaire. Inspiré par les comportements de recherche de nourriture du Casse-Noisette, l'algorithme NOA en visant l'optimisation d'un système de pompage solaire en tenant compte les conditions environnementales variables et extrêmes. L'approche bio-inspirée de l'algorithme NOA, imitant les stratégies de l'oiseau pour collecter, stocker et récupérer les graines de pin. Cet outil optimise l'énergie solaire en explorant et exploitant les meilleures solutions tout en améliorant la production d'énergie et l'efficacité de système.

## IV.2 Méthode

### IV.2.1 System description

Le système de pompage d'eau photovoltaïque (PV) est d'une puissance nominale de 1,8408 kW, intègre des panneaux solaires disposés en 8 séries/1 parallèle. Les paramètres décrits dans le Tableau IV-1, un convertisseur élévateur CC-AC, un onduleur de tension (VSI) et un moteur asynchrone couplé à une pompe centrifuge. Le système utilise une méthode de recherche MPPT pour optimiser l'énergie produite dynamiquement en agissant sur le rapport cyclique. Cote moteur, on applique le contrôle direct du couple (DTC) est appliqué, assurant un contrôle précis des performances du moteur. Cette stratégie de contrôle est illustrée à la Figure IV-1 [114].

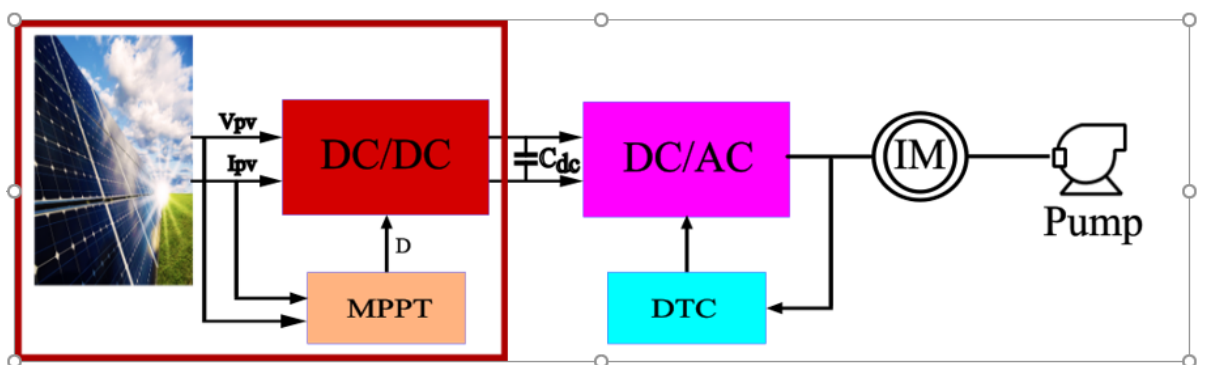


Figure IV-1: Système générale

**Tableau IV-1:** Paramètres électriques du module PV China synergy (Nanjing) SST230-60P

PV paramètre	Valeur
Puissance maximale (Pmax)	230.1W
Tension à Pmax (Vmp)	29.5V
Courant à Pmax (Imp)	7.8A
Tension en circuit ouvert (Voc)	36.8V
Courant de court-circuit (Isc)	8.45A

L'innovation de cette approche réside dans l'application d'un algorithme innovant afin d'optimiser l'extraction d'énergie du module photovoltaïque (PV) dans des conditions environnementales fluctuantes via une convergence rapide vers le point de puissance maximale avec un minimum d'oscillations, améliorant ainsi considérablement le rendement global du système.

Cette configuration est modélisée et analysée dans l'environnement MATLAB/Simulink pour une évaluation des performances de l'algorithme MPPT et de son impact énergétique et la capacité de pompage.

#### **IV.2.2 CC/CC Convertisseur**

Le convertisseur CC-CC (voir Figure IV-2) est un composant essentiel, notamment dans les systèmes PV. Cet élément essentiel, situé entre les panneaux solaires et l'onduleur, assure la régulation de la tension. La transformation de la tension CC fluctuante de sortie des panneaux solaires en une tension CC stable et plus élevée garantit le bon fonctionnement du système dans des conditions d'ensoleillement variables.

Le fonctionnement du convertisseur CC-CC est guidé par un rapport cyclique calculé et ajusté par un mécanisme de contrôle MPPT. Grâce à ça, la puissance du panneau solaire est non seulement exploitée, mais aussi optimisée malgré les fluctuations de l'irradiation solaire.

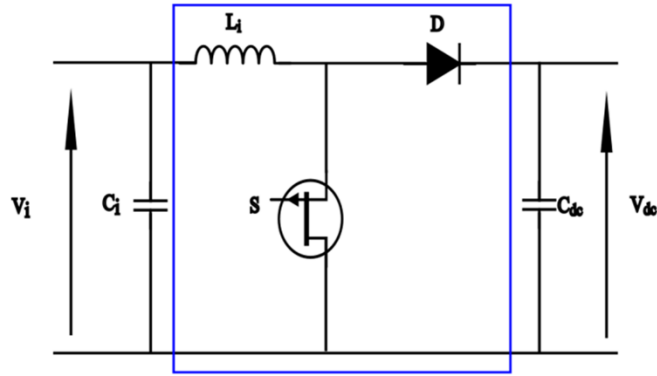


Figure IV-2: Convertisseur élévateur

$$D = \frac{V_{dc^*} - V_i}{V_{dc^*}} \quad (IV-1)$$

$V_{dc^*}$  est la tension de sortie et  $V_i$  la tension d'entrée du convertisseur élévateur.

La formule suivante permet de déterminer l'inductance du convertisseur élévateur :

$$L = \frac{V_i D}{\Delta I_L f_s} \quad (IV-2)$$

$V_i$  est la tension d'entrée,  $\Delta I_L$  est le courant d'ondulation de l'inductance et  $f_s$  est la fréquence de commutation.

$$C_i = \frac{D}{8 L \Delta_{vmp} f_s^2} \quad (IV-3)$$

$C_i$  est la capacité d'entrée et  $\Delta_{vmp}$  est le facteur d'ondulation de la tension au point de puissance maximale.

$$C_{dc} = \frac{D}{R_{dc} \Delta_{vdc^*} f_s} \quad (IV-4)$$

$C_{dc}$  est la capacité de sortie et  $\Delta_{vdc^*}$  est le facteur d'ondulation de la tension.

**Tableau IV-2:** Valeurs des paramètres du convertisseur élévateur

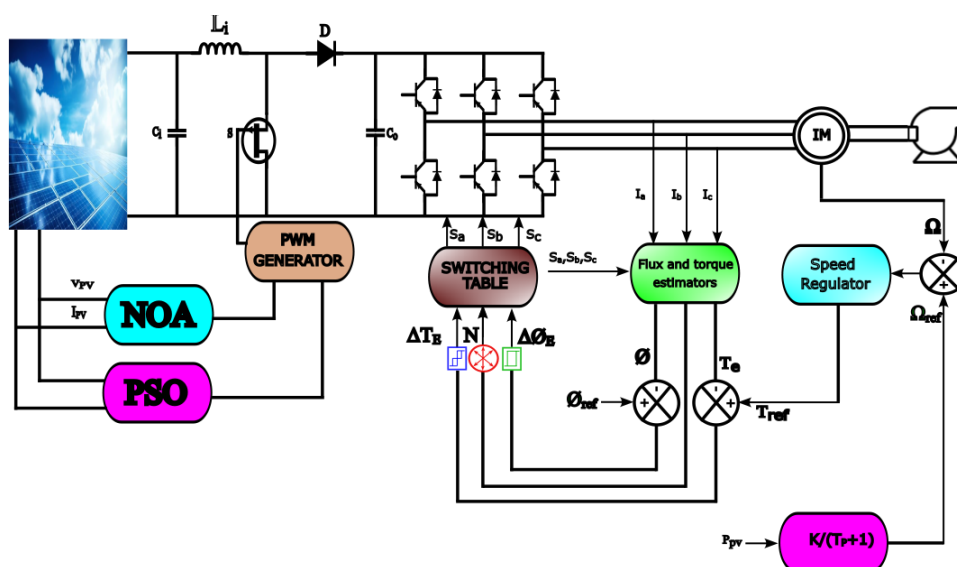
Paramètres	Valeur
$C_{dc}$	100 $\mu$ F
L	3 mH
$V_{dc}^*$	236V

**IV.2.3 Stratégie de contrôle du système proposé**

Le système de contrôle du système de pompage d'eau photovoltaïque (PV) utilise deux contrôleurs distincts : l'un dédié à la régulation du module PV et l'autre à la gestion du MAS couplé à la pompe centrifuge. Par conséquent, cette section est divisée en deux parties distinctes.

La première partie se concentre sur l'amélioration de l'efficacité du système grâce à une analyse comparative de l'optimisation par essaim de particules (PSO) et du nouvel algorithme d'optimisation (NOA) dans des conditions variables (scénario d'ombrage partiel). Cette analyse vise à évaluer les performances de chaque algorithme en termes de temps de réponse, d'efficacité et d'oscillations stationnaires, fournissant ainsi un aperçu de leur efficacité pour optimiser les performances du système photovoltaïque.

Dans la deuxième partie, la méthode de contrôle direct du couple (DTC) génère les impulsions de commutation pour l'onduleur, qui entraîne le MAS connecté à la pompe centrifuge, comme illustré dans la Figure IV-3.



**Figure IV-3:** Structure globale du PVWPS étudié avec les contrôleurs proposés

Le système utilise un MAS triphasé à cage d'écureuil dont les paramètres clés sont résumés dans le Tableau IV-3. Ce type de moteur a été sélectionné en raison de sa robustesse, de sa fiabilité et de son efficacité dans les applications industrielles.

**Tableau IV-3:** Paramètres du MAS

<b>Paramètres du moteur à induction</b>	<b>Valeurs</b>
Puissance nominale	1.5 kw
Tension nominale	220/380V
Vitesse nominale	1420 rpm
Fréquence nominale	50 Hz
Résistance statorique	4.850 $\Omega$
Résistance rotorique	3.805 $\Omega$
Inductance statorique	0.274 H
Inductance rotorique	0.274 H
Induction mutuelle	0.258 H
Nombre de paires de pôles	2

Un (VSI) est utilisé pour réguler la vitesse et le couple du moteur. Cette topologie est composée de douze (IGBT) disposés en pont triphasé. L'onduleur génère une tension de sortie alternative modulée en largeur d'impulsion (MLI), qui contrôle efficacement le moteur [115].

Le processus de contrôle comprend (DTC):

1. **Estimation du couple et du flux :** Le couple et le flux réels sont estimés en temps réel à l'aide des paramètres du moteur et des mesures de tension/courant.
2. **Calcul d'erreur :** Les valeurs estimées sont comparées à leurs valeurs de référence.
3. **Contrôle d'hystérésis :** les erreurs de couple et de flux sont traitées via des comparateurs d'hystérésis, déterminant l'action de contrôle requise.
4. **Sélection du vecteur de commutation :** en fonction de la sortie d'hystérésis et de la position instantanée du vecteur de flux, le VSI applique le vecteur de commutation le plus approprié.

Le DTC offre plusieurs avantages, notamment une réponse rapide du couple, une dépendance minimale aux paramètres du moteur, des pertes de commutation réduites et une efficacité améliorée[116].

Le système est équipé d'une pompe centrifuge conçue pour fonctionner avec une puissance absorbée maximale de 1,5 kW. Le couple de charge ( $T_{\text{pump}}$ ) de la pompe est proportionnel au carré de la vitesse du moteur ( $\Omega$ ) et s'exprime comme suit [117] :

$$T_{\text{pump}} = K_{\text{pump}} \cdot \Omega^2 \quad (\text{IV-5})$$

Où  $K_{\text{pump}}$  est la constante de proportionnalité de la pompe centrifuge. Cette relation quadratique correspond au principe de fonctionnement fondamental des pompes centrifuges, où le couple requis augmente avec la vitesse.

#### **IV.2.4 Algorithme NOA**

L'algorithme d'optimisation de Casse-Noisette (NOA) est un algorithme métaheuristique bio-inspiré qui s'inspire des comportements intelligents de l'oiseau Casse-Noisette, en particulier de ses stratégies de collecte et de stockage de graines de pin, ainsi que d'exploration et de récupération d'emplacements de stockage optimaux [118], NOA est conçu pour résoudre des problèmes d'optimisation globale complexes grâce à une approche métaheuristique.

Les casse-noisettes dans l'algorithme symbolisent des solutions potentielles qui naviguent dans des espaces de recherche complexes pour trouver des solutions optimales, comme casser une noisette pour atteindre le noyau. NOA utilise diverses stratégies telles que la migration saisonnière des groupes de casse-noisettes, l'hibernation pour préserver les solutions, la recherche de noisette individuelles ou en groupe et la rupture agressive des noisettes par les coups de bec et les chutes d'outils, facilitant l'exploration et l'exploitation convaincantes des ressources.

Ces étapes coopératives et individuelles améliorent la capacité de l'algorithme à étudier et à utiliser efficacement l'espace de recherche. Contrairement aux méthodes traditionnelles comme les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaim de particules, NOA présente une vitesse de convergence supérieure, une qualité de solution améliorée et des performances constantes sur divers problèmes d'optimisation non linéaire. Son adaptabilité et sa capacité à intégrer diverses techniques de résolution de problèmes rendent NOA particulièrement adapté

à l'apprentissage automatique, à l'exploration de données, aux réseaux sans fil et aux applications économiques.

Pour optimiser les capacités de notre système photovoltaïque de pompage d'eau, nous utilisons cette technique innovante de contrôle MPPT. Dans ce scénario spécifique, rapport cyclique est déterminé grâce à l'algorithme d'optimisation (NOA). Cette approche permet de gérer efficacement la complexité du problème d'optimisation unidimensionnel du système, garantissant une extraction d'énergie efficace dans des conditions environnementales variables.

Le fonctionnement de l'algorithme d'optimisation Casse-Noisette (NOA), nous pouvons décrire son cadre opérationnel en quatre étapes[34] :

### 1. Recherche de nourriture étape : Phase d'exploration 1

Les casse-noisettes repartent alors de leurs positions initiales dans l'espace de recherche, déterminées par l'équation (IV-21), et, un par un, ils explorent le cône de départ à la recherche de bonnes graines. S'ils en trouvent, ils les transportent vers la zone de stockage et les déposent dans une cache. Sinon, ils se dirigent vers un autre cône parmi les pins ou ailleurs. La méthode de mise à jour de position suivante peut être utilisée pour décrire quantitativement ce comportement :

$$\vec{D}_i(K+1) = \begin{cases} D_i(K) & \text{if } \delta_1 < \delta_2 \\ \begin{cases} D_i(K) + \gamma \cdot (D_A(K) - D_B(K)) \\ + \mu \cdot (c^2 \cdot D_{min} - D_{max}) \end{cases} & \text{if } K \leq \frac{K_{max}}{2.0} \\ \begin{cases} D_c(K) + \mu \cdot (D_A(K) - D_B(K)) \\ + \mu \cdot (c_1 < \Delta) \cdot (c^2 \cdot D_{min} - D_{max}) \end{cases} & \text{sinon} \end{cases} \quad (IV-6)$$

Position actuelle du  $i^{\text{ème}}$  casse-noisette est notée  $D_i(K)$ , tandis que  $D_i(K+1)$  reflète la nouvelle position dans la génération actuelle. Dans un problème d'optimisation,  $D_{min}$  et  $D_{max}$  spécifient les limites inférieure et supérieure de la dimension ; La distribution de vol de Levy est utilisée pour produire le nombre aléatoire  $\gamma$ , et  $D_{best}(K)$  est la dimension de la meilleure solution qui a été trouvée jusqu'à présent.

Les trois indices distincts A, C et B sont sélectionnés au hasard dans la population pour aider à l'étude des sources de nourriture de haute qualité ;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $c$  et  $c_1$  sont des nombres réels qui sont assignés aléatoirement dans l'intervalle  $[0,1]$  ; À l'itération  $K$ ,  $D_m(K)$  représente la dimension moyenne de toutes les solutions de la population actuelle. L'équation décrit

comment la distribution normale ( $\delta_4$ ), la loi de prélèvement ( $\delta_5$ ) et une valeur aléatoire comprise entre zéro et un ( $\delta_3$ ) sont utilisées pour générer  $\mu$ .

$$\mu = \begin{cases} \delta_3 & \text{if } c_1 < c_2 \\ \delta_4 & \text{if } c_2 < c_3 \\ \delta_5 & \text{if } c_1 < c_3 \end{cases} \quad (\text{IV-7})$$

Où  $c_2$  et  $c_3$  sont des nombres réels aléatoires dans la plage de  $[0,1]$  et  $\mu$  est un nombre aléatoire généré sur la base  $\delta_3, \delta_4, \delta_5$ .

**2. Étape de stockage : Exploitation phase 1**

La première étape consiste pour le casse-noisette à transférer la nourriture récoltée lors de la phase d'exploration vers des zones de stockage improvisées. Dans ce que l'on appelle la « phase d'exploitation 1 », les casse-noisettes rassemblent et stockent des graines de pin. Voici la représentation mathématique de ce comportement :

$$\vec{D}_i^{(\text{new})}(K + 1) \begin{cases} \vec{D}_i(K) + \mu \cdot (\vec{D}_{best}(K) - \vec{D}_i(K)) \cdot |\lambda| + c_1 \cdot (\vec{D}_A(K) - \vec{D}_B(K)) & \text{if } \delta_1 < \delta_2 \\ \vec{D}_{best}(K) + \mu \cdot (\vec{D}_A(K) - \vec{D}_B(K)) & \text{if } \delta_1 < \delta_3 \\ \vec{D}_{best}(K) \cdot l & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{IV-8})$$

La zone de stockage Casse-Noisette de l'itération K actuelle a une nouvelle position représentée par  $D_i^{(\text{nouveau})}(K+1)$ . La distribution de vol de Lévy est utilisée pour créer la valeur  $\lambda$ , un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 est noté  $\delta_3$ . Le comportement d'exploitation de l'algorithme d'optimisation Casse-Noisette (NOA) peut être modifié grâce à la variable linéairement décroissante  $l$ , comprise entre 1 et 0. Tout au long de l'optimisation, la formule suivante régit l'interaction entre la phase de recherche et la mise en cache, garantissant un équilibre entre exploration et exploitation :

$$\vec{D}_i(K + 1) = \begin{cases} \text{Eq. (IV-6),} & \text{if } \varphi > P_{a_1} \\ \text{Eq. (IV-8),} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{IV-9})$$

La valeur de  $\varphi$  peut être n'importe quel entier aléatoire compris entre zéro et un. La génération actuelle détermine la chute linéaire de la valeur de probabilité  $P_{a_1}$  de 1 à 0.

**3. Étape de recherche dans le cache : Exploration phase 2**

Les casse-noisettes passent de la cachette à l'exploration et à la recherche à mesure que les arbres se dénudent et que l'hiver approche. Ils commencent leur aventure pour découvrir

leurs réserves. La deuxième exploration décrit cette étape. À ce stade de leur développement, les casse-noisettes trouvent leurs réserves de nourriture grâce à une approche basée sur la mémoire spatiale.

On pense généralement qu'ils utilisent divers objets pour localiser une cache. Pour simplifier, imaginons qu'il y ait deux objets pour chaque cache. Ces objets, appelés marqueurs, sont placés à différents angles par rapport à la cache. Ici, en utilisant l'équation (IV-21), les casse-noisettes trouvent leurs points de départ dans l'espace de recherche (la zone de stockage), également appelés emplacements de cache. Ces points sont appelés points de référence (PR). L'algorithme d'optimisation de Casse-noisette (NOA) utilise la matrice suivante pour représenter les deux PR de chaque cache/casse-noisette de la population :

$$RPS = \begin{bmatrix} \overrightarrow{RP_{1,1}}(K) & \overrightarrow{RP_{1,2}}(K) \\ \vdots & \vdots \\ \overrightarrow{RP_{l,1}}(K) & \overrightarrow{RP_{l,2}}(K) \\ \vdots & \vdots \\ \overrightarrow{RP_{N,1}}(K) & \overrightarrow{RP_{N,1}}(K) \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (IV-10)$$

Les points de référence (objets RP) de la position du cache  $\overrightarrow{P}_i(K)$  Pour le  $i^{\text{ème}}$  casse-noisette de la génération actuelle, K est représenté par  $\overrightarrow{RP}_{l,1}(K)$  et  $\overrightarrow{RP}_{l,2}(K)$ . Afin de trouver les caches cachées autour des casse-noisettes, la position actuelle est mise à jour dans les régions voisines pour calculer le premier RP. Voici la formule mathématique permettant de créer le RP initial :

$$\overrightarrow{RP}_{l,1}(K) = \begin{cases} \overrightarrow{D}_i(K) + \alpha \cdot \cos(\theta) \cdot \left( \left( \overrightarrow{D}_A(K) - \overrightarrow{D}_B(K) \right) \right) + \alpha \cdot RP, & \text{if } \theta = \frac{\pi}{2} \\ \overrightarrow{D}_i(K) + \alpha \cdot \cos(\theta) \cdot \left( \left( \overrightarrow{D}_A(K) - \overrightarrow{D}_B(K) \right) \right) & \text{Sinon} \end{cases}$$

(IV-11)

La formule suivante est utilisée pour calculer le deuxième RP :

$$\overrightarrow{RP}_{l,2}(K) = \begin{cases} \overrightarrow{D}_i(K) + \left( \alpha \cdot \cos(\theta) \cdot \left( \left( \vec{U} - \vec{L} \right) \cdot \delta_3 + \vec{L} \right) + \alpha \cdot RP \right) \cdot \vec{U}_2 & \text{if } \theta = \frac{\pi}{2} \\ \overrightarrow{D}_i(K) + \alpha \cdot \cos(\theta) \cdot \left( \left( \vec{U} - \vec{L} \right) \cdot \delta_3 + \vec{L} \right) \cdot \vec{U}_2 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (IV-12)$$

Dans la matrice donnée par l'équation (IV-10),  $\overrightarrow{RP_{l,1}}(K)$  représente la K -ième ligne de la première colonne, et  $\overrightarrow{RP_{l,2}}(K)$  représente la k -ième ligne de la deuxième colonne. Les indices de ligne de cette matrice représentent les indices Cache/Casse-Noisette, et les indices de colonne représentent les indices RP.

L'inclusion du troisième terme du premier état dans les équations (IV-11) et (IV-12) (c.-à-d.  $\theta = \pi / 2$ ) empêche les PR de converger trop rapidement vers une solution possible. Le paramètre  $\alpha$  garantit une convergence constante du NOA, ce qui permet aux casse-noisettes d'améliorer leur sélection de PR dans les générations suivantes. La valeur de  $\alpha$  peut être déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$\alpha = \begin{cases} \left(1 - \frac{K}{K_{max}}\right)^{2\frac{K}{K_{max}}}, & \text{if } c_1 > c_2 \\ \left(\frac{K}{K_{max}}\right)^{\frac{2}{K}}, & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{IV-13})$$

Avec K représentant le nombre actuel de générations et  $K_{max}$  le maximum. Comme le nombre d'itérations diminue linéairement dans l'équation (IV-13), l'approche proposée converge plus rapidement.

Chaque casse-noisette apprend à choisir les bons RP au fur et à mesure que l'optimisation progresse. Après avoir reçu ces RP, ces casse-noisettes les utiliseront pour mettre à jour les emplacements de stockage ou les solutions. Pour trouver la meilleure solution possible, tous les casse-noisettes de l'algorithme d'optimisation des casse-noisette (NOA) utilisent un mécanisme d'exploration. L'algorithme évite les minima locaux en explorant et en exploitant les zones autour des caches avec suffisamment de RP à chaque itération. L'équation suivante peut être utilisée pour mettre à jour le nouvel emplacement d'un casse-noisette :

$$\overrightarrow{D}_i(K + 1) = \begin{cases} \overrightarrow{D}_i(K) & P_{PV}(K) < if \overrightarrow{RP_{l,1}}(K) \\ \overrightarrow{RP_{l,1}}(K) & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{IV-14})$$

où  $\overrightarrow{D}_i(K + 1)$  représente la nouvelle position ou cache du ième casse-noisette à l'itération (K+1),  $\overrightarrow{D}_i(K)$  désigne la position ou cache actuelle du ième casse-noisette à l'itération K, et  $\overrightarrow{RP_{l,1}}(K)$  est le premier point de référence (RP) de la cache actuelle pour le ième casse-noisette à l'itération K. L'équation (IV-14) est conçue pour guider l'algorithme d'optimisation de Casse-Noisette (NOA) dans l'exploration et l'exploitation des régions prometteuses autour de

$\overrightarrow{RP_{l,1}}(K)$ . Si NOA ne trouve pas les régions les plus prometteuses autour de  $\overrightarrow{RP_{l,1}}(K)$ , il cherchera dans d'autres zones, telles que celles entourant le deuxième point  $\overrightarrow{RP_{l,2}}(K)$  de référence, comme discuté ci-dessous.

Dans lequel  $\overrightarrow{D}_i(K + 1)$  représente le nouveau cache ou la nouvelle position du K-ième casse-noisette à l'itération (K+1),  $\overrightarrow{D}_i(K)$  pour son cache actuel ou sa position à l'itération K, et  $\overrightarrow{RP_{l,1}}(K)$  pour le premier point de référence (PR) du casse-noisette K dans son cache actuel à l'itération K. Afin d'aider l'algorithme d'optimisation de Casse-Noisette (NOA) à découvrir et à exploiter les zones prometteuses autour de  $\overrightarrow{RP_{l,1}}(K)$ , l'équation (IV-14) a été conçue. Suite à la discussion ci-dessous, NOA effectuera des recherches dans des zones supplémentaires, telles que celles entourant le deuxième point de référence  $\overrightarrow{RP_{l,2}}(K)$ , s'il ne découvre pas les régions les plus prometteuses près de  $\overrightarrow{RP_{l,1}}(K)$ .

**4. Phase de récupération : Exploitation phase 2**

Les casse-noisettes peuvent utiliser le premier RP pour se souvenir de la position exacte de leur cache, ce qui est la première explication plausible. Il y a deux résultats possibles : soit le repas existe, soit il n'existe pas. L'équation suivante fournit une représentation mathématique de ce phénomène. Pour retrouver sa cachette, le casse-noisette utilise des indices visuels et sa mémoire spatiale. Le casse-noisette peut être en mesure de sortir les graines de leur réserve si la récupération est réussie. Malheureusement, il arrive que le casse-noisette ne parvienne pas à récupérer sa nourriture. Cela peut être dû au fait qu'un autre animal l'a déjà mangée, que l'emplacement de la cache a été modifié en raison de variables environnementales ou que sa mémoire est inexacte. Le processus de récupération, une partie essentielle de l'algorithme d'optimisation Casse-Noisette, est compliqué et plein d'incertitudes, comme le démontrent ces problèmes. Pour trier les solutions possibles et maximiser les résultats, cet algorithme utilise des algorithmes comparables d'exploration et de recherche en mémoire.

$$D_i(K + 1) = \begin{cases} D_i(K) & \text{if } \delta_3 < \delta_4 \\ D_i(K) + c_1 \cdot (D_{best}(K) - D_i(K)) \\ + c_2 \cdot (\overrightarrow{RP_{l,1}}(K) - D_c(K)), \text{ Sinon} \end{cases} \quad (IV-15)$$

Dans l'itération K, la variable  $D_{best}(K)$  représente la position ou le cache optimal,  $D_i(K)$  est la dimension actuelle ou le cache du ième casse-noisette, et  $D_i(K + 1)$  représente la position ou le cache mis à jour à l'itération (K+1). Le point de départ de la position/cache

actuelle du ième casse-noisette dans l'itération actuelle K est représenté par le vecteur  $\overrightarrow{RP_{i,1}}(K)$ . Les valeurs de  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  et  $\delta_4$  sont créées aléatoirement de zéro à un. C'est l'indice de solution qui a été choisi aléatoirement dans la population.

Les casse-noisettes qui ne trouvent pas leur nourriture utilisent parfois des éléments remarquables adjacents, qui peuvent disparaître lorsque les saisons passent de l'automne à l'hiver. Le deuxième PR est utilisé pour mettre à jour la mémoire spatiale du casse-noisette, comme le montre l'équation (IV-16)

$$\overrightarrow{D}_i(K + 1) = \begin{cases} \overrightarrow{D}_i(K) & \text{if } P_{PV}(K) > \text{if } \left( \overrightarrow{RP_{i,2}}(K) \right) \\ \overrightarrow{RP_{i,2}}(K) & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{IV-16})$$

Dans lequel  $\overrightarrow{D}_i(K)$  représente le cache ou la position actuelle du ième casse-noisette à l'itération K et  $\overrightarrow{RP_{i,2}}(K)$  représente le deuxième point de référence (PR) associé à la cache actuelle dans la même itération. En introduisant des points chauds probables dans l'équation IV-16), l'algorithme d'optimisation de Casse-Noisette (NOA) peut étendre son rayon de recherche autour du deuxième PR. Dans l'NOA, on suppose qu'un casse-noisette utilise le deuxième PR pour trouver son cache ; l'équation (IV-15) est donc ajustée en fonction du deuxième PR.

$$D_i(K + 1) = \begin{cases} D_i(K) & \text{if } \delta_5 < \delta_6 \\ D_i(K) + c_1 \cdot (D_{best}(K) - D_i(K)) \\ + c_2 \cdot \left( \overrightarrow{RP_{i,2}}(K) - D_C(K) \right), & \text{Sinon} \end{cases} \quad \text{IV-17}$$

Les variables  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $\delta_5$  et  $\delta_6$  sont choisies au hasard entre 0 et 1. Grâce à la première condition de l'équation(IV-17), l'algorithme est en mesure d'effectuer une recherche locale plus approfondie dans les régions les plus prometteuses, qui peuvent contenir la solution quasi-optimale. La deuxième condition de l'équationIV-17), en revanche, améliore les capacités de recherche globale de l'algorithme en lui permettant d'explorer de nouvelles régions dans l'espace de recherche. En résumé, l'équation suivante représente la simulation du comportement de récupération :

$$\overrightarrow{D}_i(K + 1) = \begin{cases} \text{Eq. (IV-15),} & \text{if } \delta_7 < \delta_8 \\ \text{Eq. (IV-17),} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{IV-18})$$

où  $\delta_7$  et  $\delta_8$  sont des entiers choisis au hasard dans l'intervalle [0,1]. Un casse-noisette qui se souvient de la cache est représenté par le premier scénario de l'équation, tandis qu'un casse-

noisette qui oublie la cache est représenté par le deuxième scénario. L'équation suivante exprime l'équilibre des comportements d'exploration associés au premier et au deuxième RP :

$$\vec{D}_i(K + 1) = \begin{cases} \text{Eq. (IV-14),} & \text{if } f(\text{Eq(IV-14)}) < f(\text{Eq (IV-16)}) \\ \text{Eq. (IV-16),} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{IV-19})$$

Enfin, la formule suivante régit la transition entre la phase de recherche dans le cache et la phase de récupération, en assurant un équilibre entre l'exploration et l'exploitation :

$$\vec{D}_i(K + 1) = \begin{cases} \text{Eq. (IV-18),} & \text{if } \phi > P_{a_2} \\ \text{Eq. (IV-19),} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{IV-20})$$

Les résultats des expériences suivantes ont révélé que  $\phi$  est un nombre entier arbitraire compris entre 0 et 1, et que  $P_{a_2}$  est une valeur de probabilité fixée à 0,2.

### 5. Application de la technique d'optimisation proposée

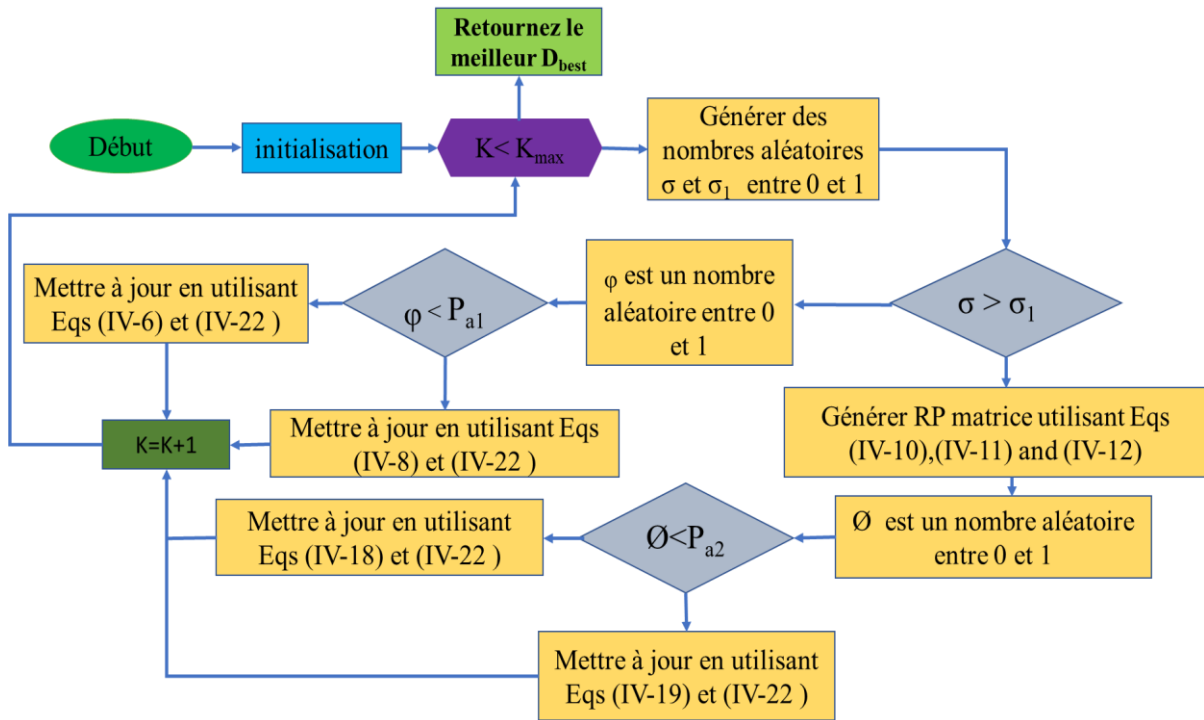
Cette section décrit en détail la technique d'optimisation proposée (NOA). Deux stratégies principales - la recherche et l'extraction de cache et la recherche et le stockage de nourriture - constituent la base de l'approche proposée. Les différentes étapes du comportement du casse-noisette sont reflétées par chaque technique. Dans NOA, les deux approches sont d'égale importance et peuvent être sélectionnées. La population de départ de NOA est formée de la même manière que les autres algorithmes d'optimisation basés sur la population :

$$\vec{D}_i(K) = + \left( \vec{D}_{min} - \vec{D}_{max} \right) \cdot \vec{RM} + \vec{D}_{max}, I = 1, 2, \dots, N, (\text{IV-21})$$

Dans ce contexte, K représente l'indice de génération, i l'indice de population,  $\vec{D}_{min}$  et  $\vec{D}_{max}$  pour les limites inférieure et supérieure du problème, respectivement, et RM est un vecteur aléatoire compris entre 0 et 1. Chaque casse-noisette représente une réponse potentielle réalisable au problème.

$$\vec{D}_i(K + 1) = \begin{cases} \vec{D}_i(K + 1) & \text{if } P_{PV}(K + 1) > P_{PV}(K) \\ \vec{D}_i(K) & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{IV-22})$$

L'organigramme de l'algorithme proposé est présenté dans la Figure IV-4



**Figure IV-4:** Organigramme de l'algorithme proposé avec les équations mathématiques

### IV.3 Résultats et interprétation

Les paramètres du système proposé est présenté dans le Tableau IV-5. Un panneau photovoltaïque China Synergy (Nanjing) SST230-60P a été utiliser, l'algorithme proposé est évalué dans MATLAB/Simulink.

$N_p = 1$ , le nombre de chaînes photovoltaïques du réseau ;

$N_s = 8$ , le nombre de modules photovoltaïques dans une chaîne photovoltaïque.

L'algorithme NOA est implémenté dans le système proposé afin d'optimiser le suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque.

Les principaux paramètres d'implémentation NOA sont détaillés ci-dessous :

Paramètres de simulation :

- Temps d'échantillonnage de contrôle :  $T_s\_Control = 1e-4$  ;
- Temps d'échantillonnage du système électrique  $T_s\_Power = 1e-6$  ;
- Temps de simulation 0-1 s
- Critères de convergence : Maximum de 30 itérations

Paramètres d'optimisation :

- Nombre d'agents de recherche : SearchAgents\_no = 3
- Limites inférieure et supérieure de l'espace de recherche : lb = 1,5 A, ub = 8 A
- Dimension du problème d'optimisation dim=1
- Suivi de la courbe de convergence : Convergence-curve=zeros (1, Max\_iter )

Algorithme NOA Paramètres Spécifiques :

- Alpha(a)=0,05; (probabilité d'éviter les optima locaux)
- Pa2=0,2; (probabilité de basculement entre la phase d'exploration et la phase de récupération)
- Prb = 0,2 ; (Probabilité d'exploration dans l'espace de recherche)

Le Tableau IV-7 présente les nombreux PSC étudiés dans ce chapitre afin de garantir la robustesse de l'algorithme proposé. Les courbes PV et IV, sous un éclairage uniforme et ombrage partiel, sont présentées dans les Figure IV-5 a Figure IV-8.

Dans le cas 1, le système PV est partiellement ombragé : trois modules sont exposés à 1 000 W/m<sup>2</sup>, deux à 600 W/m<sup>2</sup> et trois à 800 W/m<sup>2</sup>.

- Dans le cas 2, le système PV est partiellement ombragé car un module est exposé à 600 W/m<sup>2</sup>, quatre à 800 W/m<sup>2</sup> et trois à 1 000 W/m<sup>2</sup>.
- Dans le cas 3, le système PV est partiellement ombragé car un module est exposé à 400 W/m<sup>2</sup>, quatre à 700 W/m<sup>2</sup> et trois à 200 W/m<sup>2</sup>.

La puissance maximale du système photovoltaïque avec un ensoleillement de 1 000 W/m<sup>2</sup> est de 1,8408 kW. Un convertisseur élévateur permet d'extraire 420 V supplémentaires du système photovoltaïque.

La configuration de simulation est configurée comme décrit dans le Tableau IV-4.

**Tableau IV-4:** Configuration et paramètres de simulation

Paramètre de Simulation	Valeur
Simulation Type	Discrète
Temps d'échantillonnage	1e <sup>-6</sup> s
Solveur discret	TBE
Temps de simulation	0 - 1 s

Type de solveur	Pas variable
Solveur utilisé	ode23t (Modified Stiff/Trapezoidal)
Tolérance relative	$1e^{-3}$
Tolérance obsolète	Auto
Analyse de convergence	Système entier

Les paramètres spécifiques utilisés pour l'algorithme PSO dans nos simulations sont présentés dans le Tableau IV-6. Ces valeurs, y compris le nombre d'itérations, la taille de l'essaim, le poids d'inertie et les coefficients cognitifs et sociaux, ont été sélectionnées sur la base des pratiques de réglage PSO standard et de la littérature antérieure.

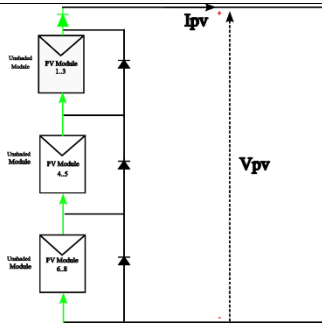
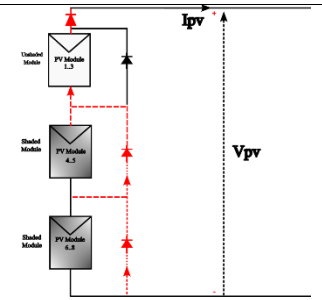
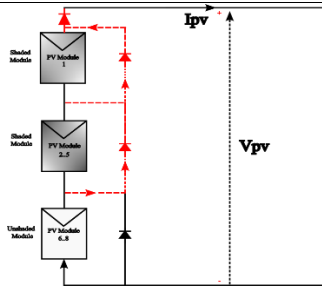
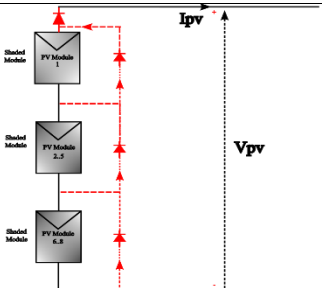
**Tableau IV-5:** Paramètres du système proposé

Paramètre	Valeurs
$C_{input}$	$125 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
$L_{boost}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ H}$
$C_{dc}$	$100 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
$V_{pv}$	236 V
$I_{pv}$	7.8 A
$V_{dc}$	420 V
$P_{pv}$	1.8408 Kw

**Tableau IV-6:** Paramètres utilisés pour l'algorithme PSO

Paramètre PSO	Valeur
Itération	30
Taille de l'essaim	3
Poids	0.4
C1	1
C2	1.6

**Tableau IV-7:** Conditions d'ombrage partiel

Numéro de cas	Configuration d'ombrage	Niveaux d'irradiance (W/m <sup>2</sup> )
Cas 1		8 modules exposés à 1000 W/m <sup>2</sup>
Cas 2		(3 modules exposés à 1000 W/m <sup>2</sup> , 2 modules exposés à 600 W/m <sup>2</sup> et 3 modules exposés à 800 W/m <sup>2</sup> ),
Cas 3		(1 modules exposés à 600 W/m <sup>2</sup> , 4 modules exposés à 800 W/m <sup>2</sup> et 3 modules exposés à 1000 W/m <sup>2</sup> ),
Cas 4		(1 modules exposés à 400 W/m <sup>2</sup> , 4 modules exposés à 700 W/m <sup>2</sup> et 3 modules exposés à 200 W /m <sup>2</sup> )

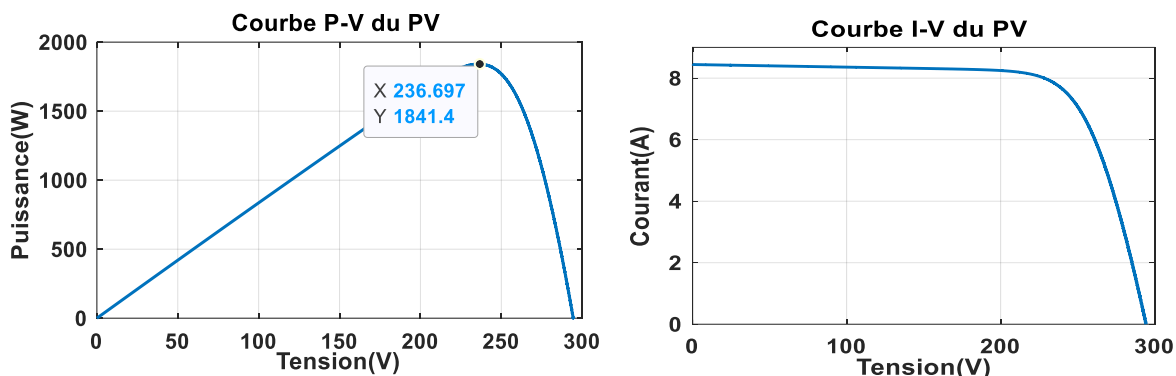


Figure IV-5:Caractéristiques P-V et I-V dans les conditions d'ombrage partiel du cas 1

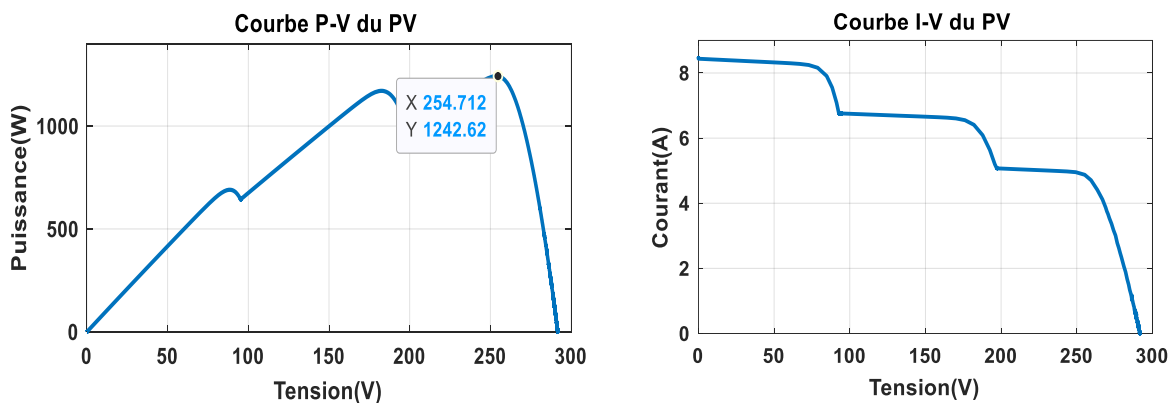


Figure IV-6:Caractéristiques P-V et I-V dans les conditions d'ombrage partiel du cas 2

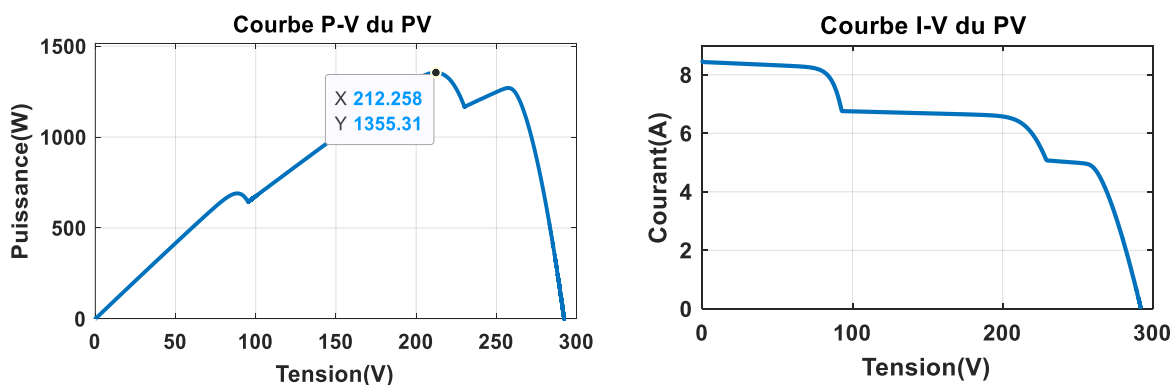
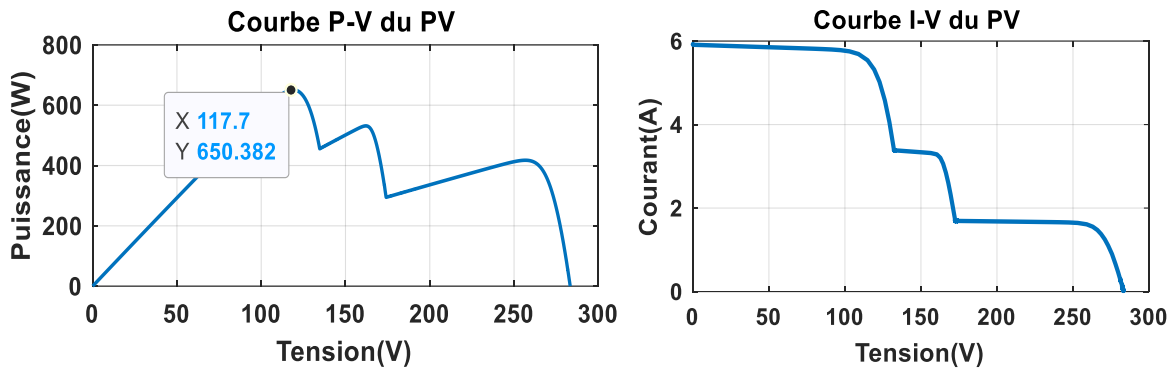


Figure IV-7:Caractéristiques P-V et I-V dans les conditions d'ombrage partiel du cas 3



**Figure IV-8:**Caractéristiques P-V et I-V dans les conditions d'ombrage partiel du cas 4

Dans des conditions standard, la courbe caractéristique photovoltaïque présente une puissance maximale (MPP) nette, facilement détectable par un simple algorithme MPPT. Cependant, en cas d'ombrage partiel (PSC), les diodes de dérivation s'activent, modifiant la courbe caractéristique et créant plusieurs MPP, dont un point de puissance maximale global (GMPP) et plusieurs points de puissance maximale locaux (LMPP). Le nombre de LMPP dépend du motif d'ombrage et de la configuration du panneau photovoltaïque, ce qui complique l'extraction de la puissance maximale. Les algorithmes MPPT conventionnels, utilisables en ombrage uniforme, rencontrent des difficultés avec les PSC, risquant de ne pas détecter le GMPP et d'entraîner des pertes de puissance.

Les courbes PV et IV (Figure IV-5 a Figure IV-8) sous un rayonnement uniforme et différentes conditions d'ombrage partiel illustrent l'impact de l'ombrage sur la sortie du réseau PV, mettant en évidence l'apparition de plusieurs points de puissance maximale (MPP), ce qui complique le processus d'extraction de puissance maximale.

Les Figure IV-9 a Figure IV-12 présentent la puissance de sortie du système photovoltaïque pour chaque cas d'ombrage. Les résultats indiquent que la puissance de sortie est significativement affectée en cas d'ombrage partiel, le cas 1 présentant le schéma d'ombrage le plus complexe et la puissance de sortie la plus faible. À l'inverse, le cas 4, avec un ombrage uniforme, présente un MPP transparent et facilement traçable.

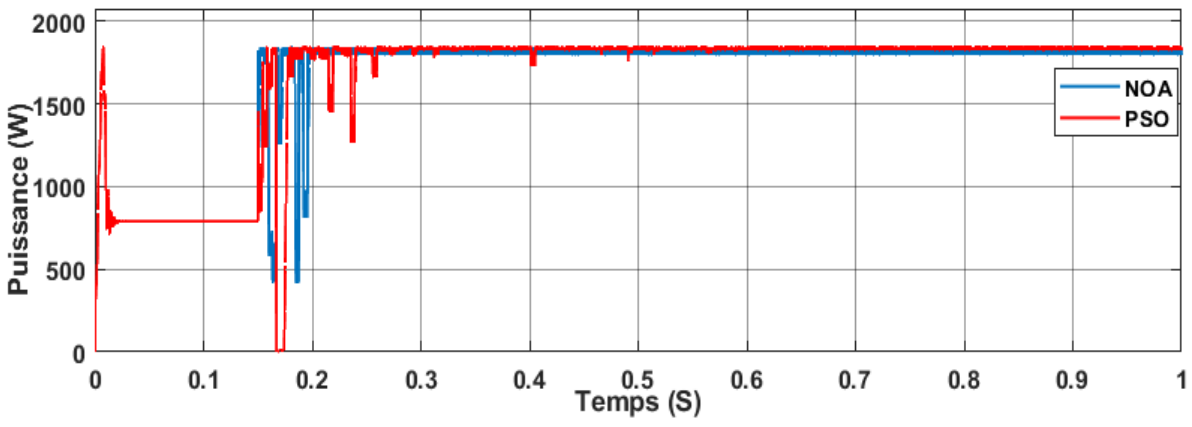


Figure IV-9: Puissance photovoltaïque pour le cas 1

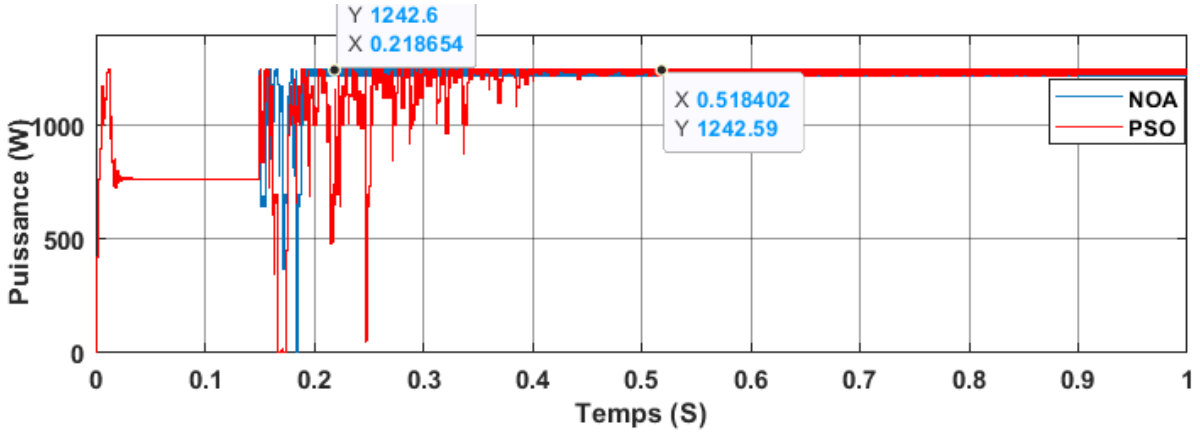


Figure IV-10: Puissance photovoltaïque pour le cas 2

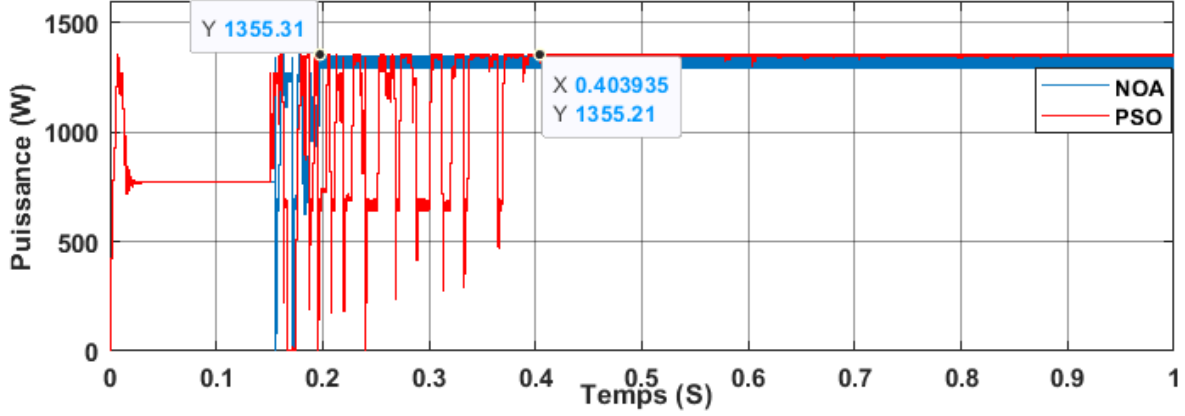
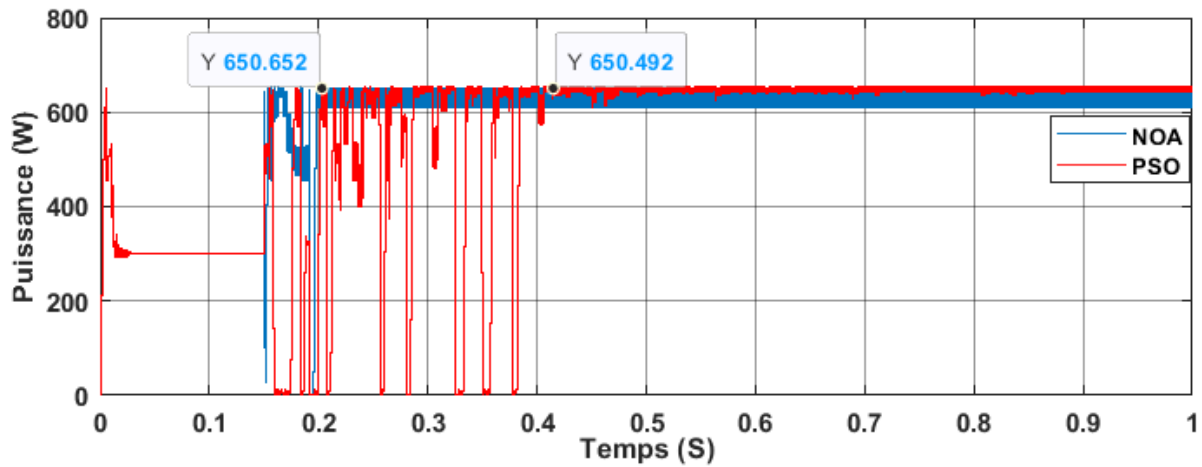
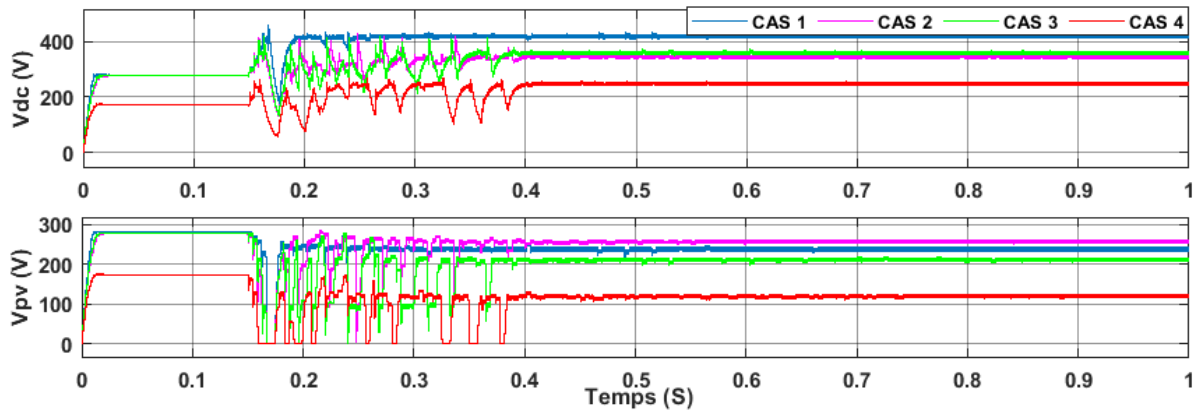


Figure IV-11: Puissance photovoltaïque pour le cas 3



**Figure IV-12:** Puissance photovoltaïque pour le cas 4

Les Figure IV-13 et Figure IV-14 illustrent la tension du circuit intermédiaire ( $V_{dc}$ ) et la tension PV ( $V_{pv}$ ) dans des conditions d'ombrage variables, à l'aide des algorithmes PSO et NOA. L'algorithme NOA affiche des performances supérieures pour maintenir des niveaux de tension stables et optimiser la puissance de sortie dans des conditions fluctuantes. Cette stabilité est essentielle au bon fonctionnement du système PVWPS.



**Figure IV-13:**  $V_{dc}$  et  $V_{pv}$  dans un cas variable avec PSO

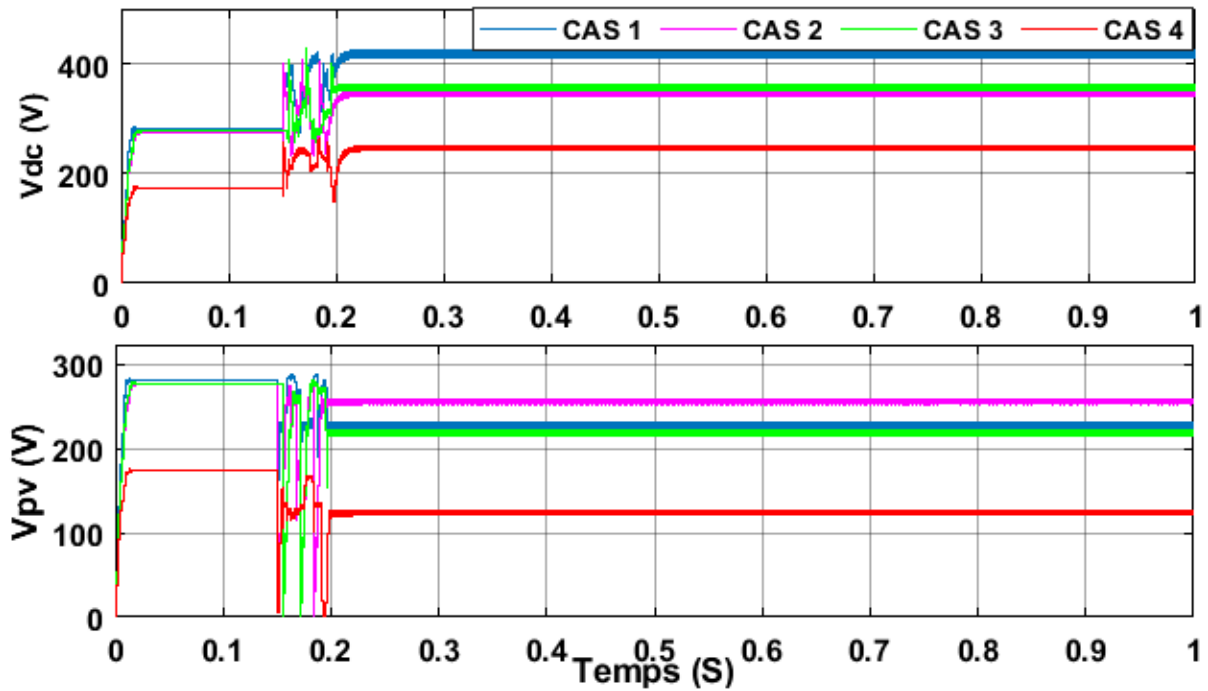


Figure IV-14: Vdc et Vpv dans un cas variable avec NOA

Les Figure IV-15 a Figure IV-18 illustrent le couple et la vitesse du rotor du moteur à induction pour chaque cas d'ombrage. Les résultats mettent en évidence les performances du moteur sous différentes puissances d'entrée. L'algorithme NOA maintient un fonctionnement constant du moteur, garantissant ainsi un pompage fiable de l'eau, même dans des conditions d'ombrage variables.

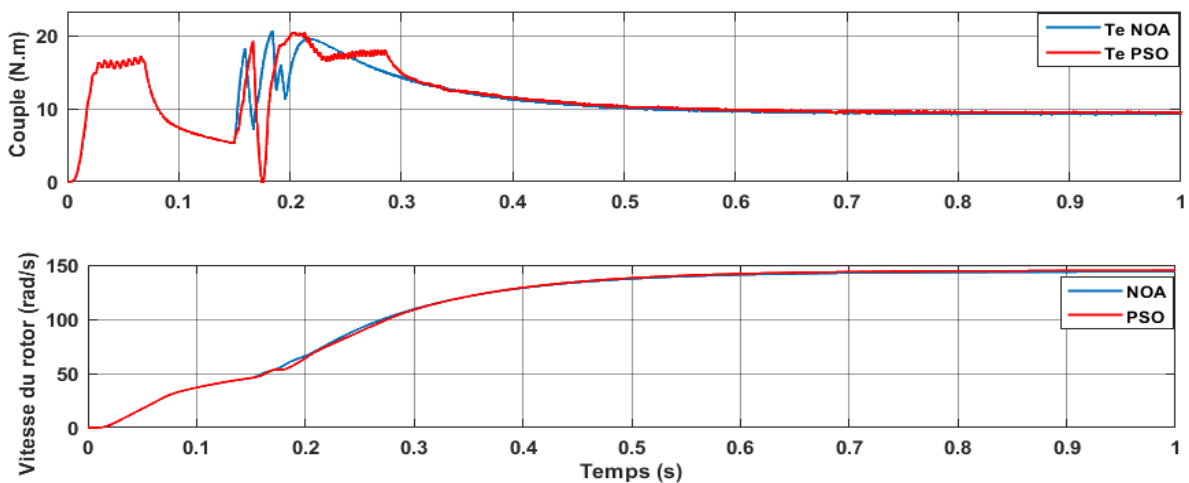


Figure IV-15: Couple et vitesse du rotor pour le cas 1

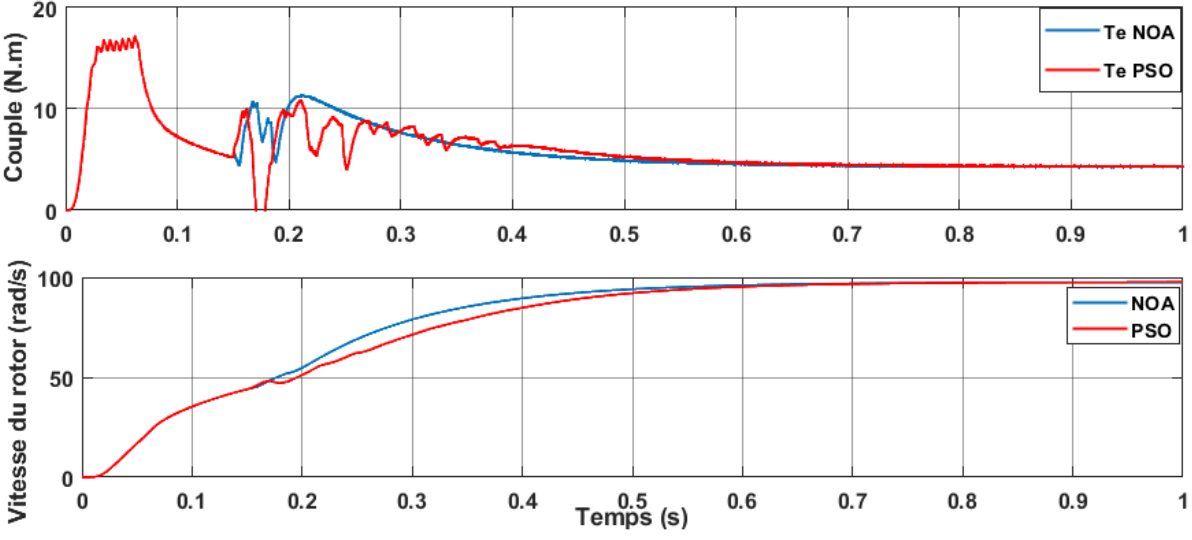


Figure IV-16: Couple et vitesse du rotor pour le cas 2

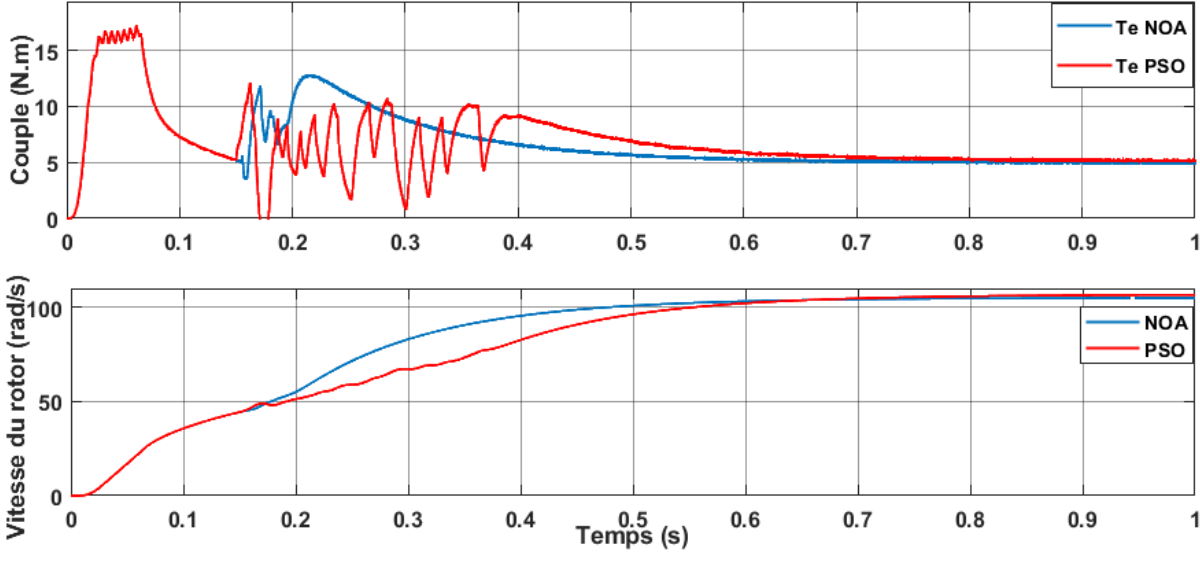
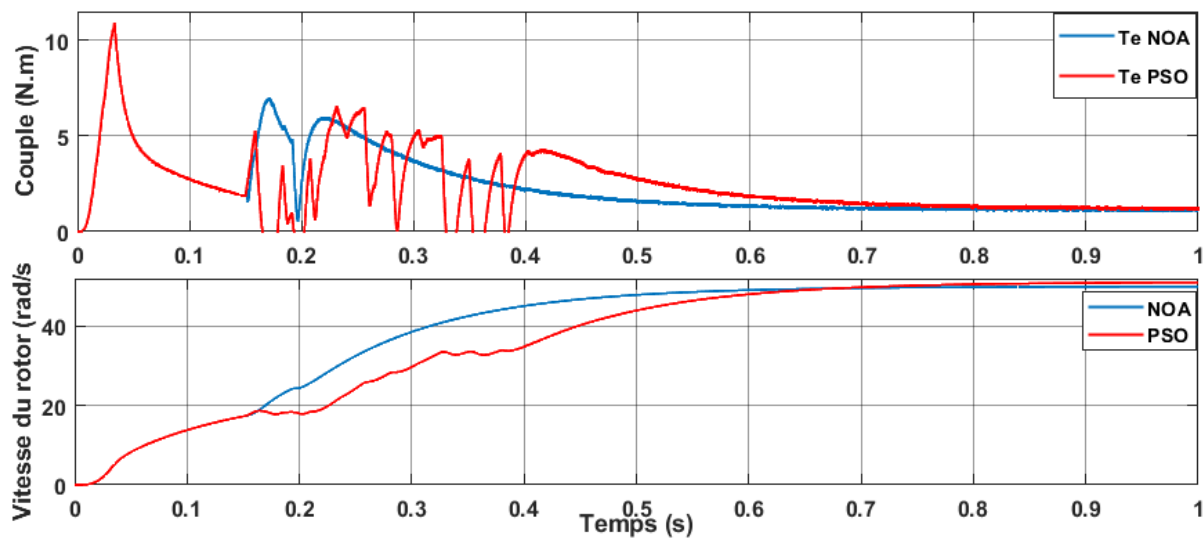
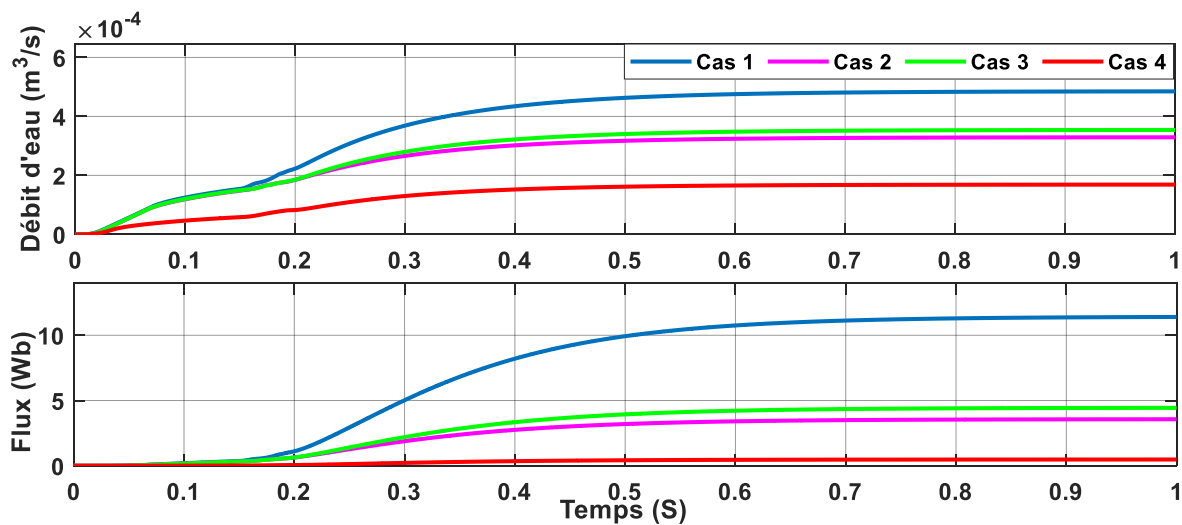


Figure IV-17: Couple et vitesse du rotor pour le cas 3

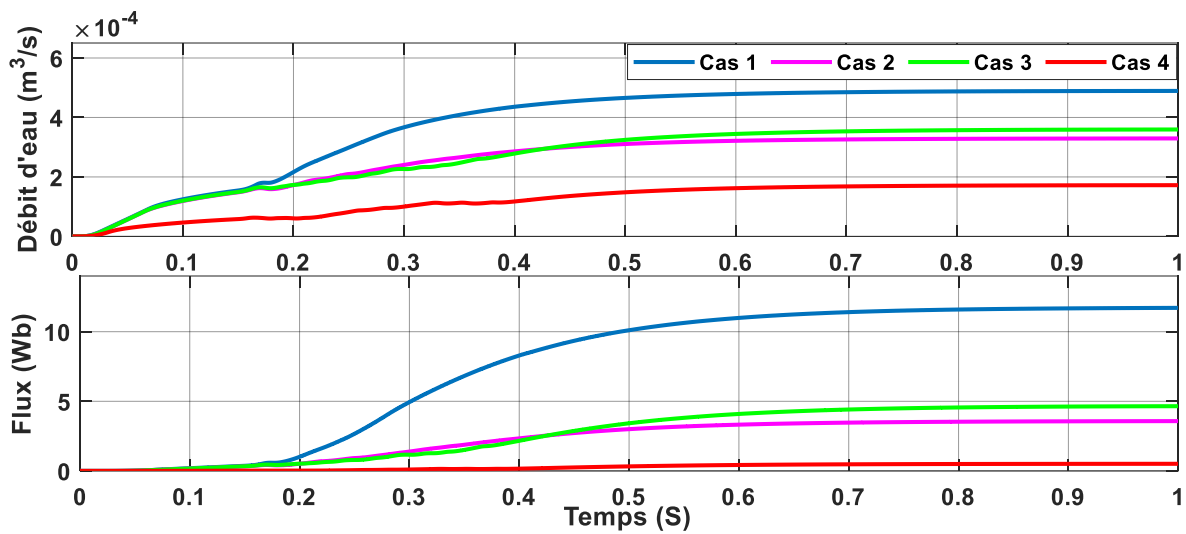


**Figure IV-18:** Couple et vitesse du rotor pour le cas 4

Les Figure IV-19 et Figure IV-20 comparent le débit d'eau et le flux dans des conditions variables en utilisant les algorithmes NOA et PSO.



**Figure IV-19:** Débit d'eau et flux dans le cas variable avec NOA



**Figure IV-20:** Débit d'eau et flux dans le cas variable avec PSO

Les résultats montrent que l'algorithme NOA améliore significativement le débit d'eau et minimise les pertes d'énergie par rapport à l'algorithme PSO, ce qui souligne l'efficacité de l'algorithme NOA dans la gestion des conditions environnementales dynamiques :

**Puissance de sortie :** Le NOA a toujours plus performant que le PSO dans le suivi du point de puissance maximale globale (GMPP), comme le montrent les Figure IV-9 à Figure IV-12. Le NOA suit le GMPP de manière cohérente et plus efficace que le PSO, garantissant ainsi une puissance de sortie plus élevée dans tous les scénarios PSC. La capacité de la NOA à converger rapidement vers le GMPP améliore l'efficacité de l'extraction d'énergie.

**Régulation de la tension :** Les Figure IV-13 à Figure IV-14 comparent la tension de la liaison CC (Vdc) et la tension de sortie PV (Vpv) dans des conditions variables. Le NOA a maintenu des niveaux de tension plus stables, ce qui indique une meilleure adaptation aux variations d'ombrage et une minimisation des pertes de puissance.

**Temps de réponse et stabilité :** les stratégies de recherche avancées de NOA réduisent les oscillations et améliorent la stabilité du système PV, ce qui se traduit par des temps de réponse plus rapides et des performances constantes.

Les réponses en termes de couple et de vitesse du rotor dans différents cas, comme illustré dans les Figure IV-15 à Figure IV-18, indiquent que le NOA offre une commande moteur plus fluide et plus stable que le PSO, qui est essentiel pour maintenir l'efficacité et la longévité du

moteur. Le NOA réduit considérablement les ondulations de couple, garantissant une vitesse de rotor stable et améliorant la fiabilité globale du système de pompage d'eau.

**Données de débit et de flux d'eau dans des conditions variables :** les Figure IV-19 et Figure IV-20 mettent en évidence la supériorité du NOA par rapport au PSO pour obtenir des débits d'eau plus élevés et un fonctionnement plus efficace des pompes. L'augmentation du débit d'eau se traduit directement par une amélioration des performances et de l'utilité du système.

L'analyse comparative démontre que le NOA surpasse les méthodes MPPT conventionnelles, y compris le PSO, dans plusieurs domaines clés :

- Les algorithmes de recherche sophistiqués de NOA facilitent l'identification rapide du point de puissance maximale globale (GMPP).
- NOA garantit une puissance de sortie stable et constante en minimisant les fluctuations.
- Une stabilité qui améliore performances globales, permettant d'atteindre un rendement supérieur.

Ces résultats ont des implications importantes pour le domaine plus large des systèmes d'énergie renouvelable. Les améliorations apportées aux techniques MPPT et aux stratégies de contrôle mettent en évidence le potentiel d'applications solaires plus efficaces et plus résilientes. Ces avancées sont cruciales pour améliorer la viabilité économique et l'efficacité opérationnelle des solutions d'énergie solaire, soutenant ainsi la transition mondiale vers des sources d'énergie durables.

L'analyse comparative entre NOA et PSO pour MPPT, présentée dans le Tableau IV-8.

Les résultats indiquent que le PSO présente une efficacité de suivi supérieure par temps clair (cas 1), atteignant le MPP plus rapidement ( $\sim 0,2$  s), mais avec des fluctuations de puissance plus importantes (écart type = 371 W) et d'une ondulation en régime permanent plus importante (20 W). À l'inverse, le NOA présente une stabilité supérieure, notamment en conditions d'ombrage partiel et important (cas 3 et 4), où il maintient un écart type plus faible (200 W contre 230 W en cas d'ombrage extrême) et une erreur de suivi réduite, ce qui le rend plus fiable pour les applications nécessitant une puissance de sortie constante.

Un écart type plus faible indique une extraction d'énergie plus constante, ce qui est crucial pour les systèmes/installations où des fluctuations soudaines peuvent entraîner des problèmes

de qualité de l'énergie. L'écart type réduit du NOA sous ombrage implique une plus grande fiabilité pour les applications réelles telles que la nôtre.

De plus, l'ondulation à l'état stable plus faible du NOA (10 W dans des conditions claires, 25 W à l'ombre) suggère qu'il est plus adapté aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau et aux solutions de pompage d'eau, où les fluctuations de puissance peuvent affecter les performances.

Si le PSO est avantageux pour les variations rapides d'irradiance grâce à son temps de réponse plus rapide, ses fluctuations et son instabilité plus importantes dans les conditions d'ombrage le rendent moins adapté aux environnements fréquemment ombragés. Le NOA, malgré sa convergence légèrement plus lente ( $\sim 0,25$  s à  $0,35$  s), assure une transition plus douce vers le MPP et une plus grande fiabilité, ce qui en fait le meilleur choix pour les applications privilégiant la stabilité à la vitesse.

Pour les conditions météorologiques dynamiques, un temps de réponse plus rapide est avantageux. Cependant, si la stabilité de la puissance est primordiale, la transition plus progressive mais plus douce du NOA est préférable.

De plus, une ondulation plus faible est souhaitable pour une intégration stable du photovoltaïque avec les convertisseurs CC-CC, réduisant ainsi la contrainte sur les composants électroniques de puissance. La faible ondulation du NOA suggère qu'il pourrait être plus compatible avec les systèmes photovoltaïques hybrides et raccordés au réseau.

**Tableau IV-8:** Mesure et analyse statistique des performances des algorithmes NOA et PSO

	<b>Cas 1</b>	<b>Cas 2</b>	<b>Cas 3</b>	<b>Cas 4</b>
<b>MAE (W)</b>	<i>30</i>	<i>25</i>	<i>35</i>	<i>40</i>
<b>SD NOA (W)</b>	<i>376</i>	<i>350</i>	<i>290</i>	<i>200</i>
<b>SD PSO (W)</b>	<i>371</i>	<i>360</i>	<i>320</i>	<i>230</i>
<b>Efficacité de suivi NOA %</b>	<i>89,97</i>	<i>90</i>	<i>88</i>	<i>85</i>
<b>Efficacité de suivi PSO %</b>	<i>91,09</i>	<i>89</i>	<i>86</i>	<i>82</i>
<b>Erreur de suivi NOA (W)</b>	<i>184</i>	<i>135</i>	<i>150</i>	<i>100</i>
<b>Erreur de suivi PSO (W)</b>	<i>164</i>	<i>145</i>	<i>170</i>	<i>120</i>
<b>Ondulation en régime permanent NOA (W)</b>	<i>10</i>	<i>12</i>	<i>20</i>	<i>25</i>
<b>Ondulation en régime permanent PSO (W)</b>	<i>20</i>	<i>25</i>	<i>40</i>	<i>50</i>
<b>SD NOA filtrée</b>	<i>5</i>	<i>8</i>	<i>12</i>	<i>20</i>

<b>SD PSO filtrée</b>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>25</i>	<i>35</i>
<b>Meilleur Algorithm</b>	<b>PSO</b>	<b>NOA</b>	<b>NOA</b>	<b>NOA</b>

#### **IV.4 Conclusion**

Cette étude a présenté un système avancé de pompage d'eau photovoltaïque (PVWPS), alimenté par un moteur asynchrone triphasé (MAS) et optimisé grâce à l'algorithme d'optimisation (NOA) bio-inspiré pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT). En éliminant le stockage d'énergie chimique, le système améliore l'efficacité énergétique, la fiabilité et la durabilité, facteurs essentiels pour les applications d'approvisionnement en eau hors réseau et à distance.

La stratégie MPPT basée sur NOA proposée a démontré des avantages significatifs par rapport aux techniques conventionnelles, notamment dans des conditions environnementales dynamiques telles qu'un ombrage partiel. Les résultats de simulation ont confirmé que NOA atteint une précision MPPT élevée (supérieure à 98,7 %), une amélioration de 10 % de l'extraction d'énergie et une augmentation de 15 % du rendement de pompage de l'eau, surpassant la méthode de référence d'optimisation par essaim de particules (PSO). De plus, le système a maintenu des tensions de liaison DC et PV stables avec des fluctuations minimales (< 1 %), assurant le bon fonctionnement du convertisseur DC-DC et de l'onduleur. L'intégration d'une stratégie de contrôle direct du couple (DTC) à 12 secteurs et d'un onduleur à point neutre bloqué (NPC) à trois niveaux a minimisé les ondulations de couple du moteur, améliorant ainsi les performances globales et garantissant un débit d'eau constant.

Au-delà des performances techniques, cette étude met en évidence les implications plus larges de l'utilisation de l'optimisation bio-inspirée dans telles applications. L'adaptabilité et l'efficacité de NOA en font une solution prometteuse pour le pompage durable de l'eau, notamment dans les régions où l'accès aux sources d'énergie conventionnelles est limité. Les résultats soulignent le potentiel des algorithmes bio-inspirés pour relever les principaux défis liés à la dynamique non linéaire, aux optima locaux multiples et aux conditions environnementales fluctuantes dans les systèmes d'énergie solaire.

### Conclusion générale :

Les systèmes multi-sources revêtent une importance capitale dans le processus d'électrification des régions rurales. Néanmoins, en raison de leur complexité et de leurs coûts élevés, les préférences se dirigent vers des alternatives plus durables et abordables, comme le pompage solaire. L'énergie solaire se distingue par son efficacité, en raison de sa disponibilité abondante et de sa capacité à être mise en œuvre dans des zones reculées. Le futur de l'électrification des zones rurales dépend donc de l'utilisation de systèmes solaires optimisés qui intègrent des technologies avancées afin d'améliorer leur efficacité.

Le recours à des convertisseurs à un seul étage, comme le convertisseur quasi-Z Source (qZSI), est justifié par leur efficacité, leur réduction des coûts et leur fiabilité accrue. Les convertisseurs présentent une capacité de boost intégrée qui garantit une production stable, même en cas de variations solaires, ce qui s'avère crucial pour des applications telles que le pompage solaire. En outre, la conception simplifiée, la meilleure fiabilité et la compatibilité avec des algorithmes avancés font du qZSI un choix optimal pour améliorer l'efficacité de l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque, en particulier dans des régions reculées.

L'incorporation d'un algorithme métaheuristique de dernière génération, tel que l'Algorithme d'Optimisation Nutcracker (NOA), dans la méthode de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT), offre la possibilité au système de s'ajuster instantanément aux changements rapides de luminosité, notamment en présence d'ombrage partiel ou d'instabilité atmosphérique, garantissant ainsi une amélioration de la stabilité et de l'efficacité. De plus, l'emploi d'une structure à deux étages permet d'optimiser la régulation de la tension du bus DC en diminuant les variations de tension. Malgré le fait que les systèmes à double étage puissent impliquer des coûts initiaux plus élevés et des dimensions plus importantes que les convertisseurs intégrés tels que les qZSI, leur capacité à améliorer l'efficacité, à réduire les fluctuations de tension et à assurer une qualité énergétique supérieure en font une solution extrêmement performante et durable pour les applications autonomes de pompage solaire photovoltaïque. Cette solution est particulièrement adaptée aux environnements contraignants où la stabilité, l'adaptabilité et la qualité énergétique sont des critères critiques.

En perspective, le schéma présenté dans cette étude peut être modifié pour améliorer ses performances, notamment en implémentant le nouvel algorithme d'optimisation sur différents systèmes et en réalisant des tests avec des données réelles.

## Conclusion générale

### Travaux futurs :

Les travaux futurs se concentreront sur la validation expérimentale à travers les étapes clés suivantes :

- Un prototype de système de pompage d'eau photovoltaïque (PVWPS) sera construit, intégrant le contrôleur MPPT basé sur NOA.
- Des capteurs de haute précision seront utilisés pour mesurer la tension photovoltaïque ( $V_{pv}$ ), le courant ( $I_{pv}$ ) et les paramètres environnementaux. Leur impact sur la prise de décision en temps réel de NOA sera évalué.
- Exploration de techniques d'optimisation hybrides, intégration de NOA avec des méthodes d'apprentissage profond ou de contrôle adaptatif pour des performances améliorées.
- Évaluation de la stabilité du système à long terme, y compris l'impact des variations environnementales sur la durée de vie et la maintenance du système.
- Utiliser ce nouvelle algorithme NOA dans le système qZSI

Ces travaux futurs combleront le fossé entre les simulations théoriques et l'applicabilité dans le monde réel, en fournissant une validation empirique de l'efficacité du NOA dans les systèmes de pompage d'eau alimentés par PV.

### Références

- [1] N. S. M. N. Izam, Z. Itam, W. L. Sing, and A. Syamsir, “Sustainable Development Perspectives of Solar Energy Technologies with Focus on Solar Photovoltaic—A Review,” *Energies*, vol. 15, no. 8, pp. 2790–2790, Apr. 2022, doi: 10.3390/EN15082790.
- [2] B. Tiar, S. O. Fadlallah, D. E. Benhadji Serradj, P. Graham, and H. Aagela, “Navigating Algeria towards a sustainable green hydrogen future to empower North Africa and Europe’s clean hydrogen transition,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 61, pp. 783–802, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.02.328.
- [3] Y. Kebbati and L. Baghli, “Design, modeling and control of a hybrid grid-connected photovoltaic-wind system for the region of Adrar, Algeria,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 6, pp. 6531–6558, Aug. 2022, doi: 10.1007/S13762-022-04426-Y.
- [4] L. Gevorkov, J. L. Domínguez-García, and L. T. Romero, “Review on Solar Photovoltaic-Powered Pumping Systems,” *Energies*, vol. 16, no. 1, pp. 94–94, Dec. 2022, doi: 10.3390/EN16010094.
- [5] S. Yang, H. Lei, and Z. Liu, “Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic (PV) System,” *Toward Better Photovolt. Syst.*, pp. 1–28, Jan. 2023, doi: 10.1063/9780735425613\_001.
- [6] B. Yang *et al.*, “Novel bio-inspired memetic salp swarm algorithm and application to MPPT for PV systems considering partial shading condition,” *J. Clean. Prod.*, vol. 215, pp. 1203–1222, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.150.
- [7] S. A. Raj, E. Elakkiya, S. Rajmohan, and G. G. Samuel, “CGFSSO: the co-operative guidance factor based Salp Swarm Optimization algorithm for MPPT under partial shading conditions in photovoltaic systems,” *Int. J. Inf. Technol.*, pp. 1–16, May 2024, doi: 10.1007/S41870-024-01931-W/METRICS.
- [8] S. Senthilkumar *et al.*, “Nature-inspired MPPT algorithms for solar PV and fault classification using deep learning techniques,” *Discov. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–24, Jan. 2025, doi: 10.1007/S42452-024-06446-4/FIGURES/14.
- [9] A. Sani Hassan, L. Cipcigan, and N. Jenkins, “Optimal battery storage operation for PV systems with tariff incentives,” *Appl. Energy*, vol. 203, pp. 422–441, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.06.043.
- [10] W. Li and X. He, “Review of nonisolated high-step-up DC/DC converters in photovoltaic grid-connected applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1239–1250, Apr. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2049715.
- [11] F. Z. Peng, “Z-source inverter,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 2, pp. 504–510, Mar. 2003, doi: 10.1109/TIA.2003.808920.
- [12] D. Mande, J. P. Trovão, and M. C. Ta, “Comprehensive Review on Main Topologies of Impedance Source Inverter Used in Electric Vehicle Applications,” *World Electr. Veh. J. 2020, Vol. 11, Page 37*, vol. 11, no. 2, p. 37, Apr. 2020, doi: 10.3390/WEVJ11020037.
- [13] Y. Li, J. Anderson, F. Z. Peng, and L. Dichen, “Quasi-z-source inverter for

## Références

- photovoltaic power generation systems,” *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 918–924, 2009, doi: 10.1109/APEC.2009.4802772.
- [14] J. Anderson and F. Z. Peng, “Four quasi-Z-Source inverters,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 2743–2749, 2008, doi: 10.1109/PESC.2008.4592360.
- [15] M. Shen and F. Z. Peng, “Operation modes and characteristics of the Z-source inverter with small inductance or low power factor,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, pp. 89–96, Jan. 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.909063.
- [16] T. Kayiranga, H. Li, X. Lin, Y. Shi, and H. Li, “Abnormal Operation State Analysis and Control of Asymmetric Impedance Network-Based Quasi-Z-Source PV Inverter (AIN-qZSI),” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 11, pp. 7642–7650, Nov. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2016.2515995.
- [17] C. T. Morris, D. Han, and B. Sarlioglu, “Reduction of Common Mode Voltage and Conducted EMI Through Three-Phase Inverter Topology,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 1720–1724, Mar. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2608388.
- [18] M. W. Lotfy, S. M. Dabour, R. M. Mostafa, D. J. Almakhlis, and M. F. Elmorshedy, “Modeling and Control of a Voltage-Lift Cell Split-Source Inverter With MPPT for Photovoltaic Systems,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 54699–54712, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3280602.
- [19] M. Sarvi and A. Azadian, “A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems,” *Energy Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 281–320, May 2022, doi: 10.1007/S12667-021-00427-X/METRICS.
- [20] M. Seyedmahmoudian *et al.*, “Simulation and Hardware Implementation of New Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded PV System Using Hybrid DEPSO Method,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 850–862, Jul. 2015, doi: 10.1109/TSTE.2015.2413359.
- [21] H. Bounechba, A. Bouzid, H. Snani, and A. Lashab, “Real time simulation of MPPT algorithms for PV energy system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 83, pp. 67–78, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.IJEPES.2016.03.041.
- [22] K. Y. Yap, C. R. Sarimuthu, and J. M. Y. Lim, “Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: A review,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 1043–1059, Nov. 2020, doi: 10.35833/MPCE.2020.000159.
- [23] V. L. Mishra, Y. K. Chauhan, and K. S. Verma, “A critical review on advanced reconfigured models and metaheuristics-based MPPT to address complex shadings of solar array,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 269, p. 116099, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.116099.
- [24] M. Hamza Zafar *et al.*, “A novel meta-heuristic optimization algorithm based MPPT control technique for PV systems under complex partial shading condition,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 47, p. 101367, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SETA.2021.101367.
- [25] E. Mendez-Flores, A. Ortiz, I. Macias, and A. Molina, “Experimental Validation of an Enhanced MPPT Algorithm and an Optimal DC–DC Converter Design Powered by Metaheuristic Optimization for PV Systems,” *Energies 2022, Vol. 15, Page 8043*, vol.

- 15, no. 21, p. 8043, Oct. 2022, doi: 10.3390/EN15218043.
- [26] J. Aguila-Leon, C. Vargas-Salgado, C. Chiñas-Palacios, and D. Díaz-Bello, “Solar photovoltaic Maximum Power Point Tracking controller optimization using Grey Wolf Optimizer: A performance comparison between bio-inspired and traditional algorithms,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 211, p. 118700, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.ESWA.2022.118700.
- [27] A. Subramanian and J. Raman, “Grasshopper optimization algorithm tuned maximum power point tracking for solar photovoltaic systems,” *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 12, no. 9, pp. 8637–8645, Sep. 2021, doi: 10.1007/S12652-020-02593-9/METRICS.
- [28] A. M. Eltamaly, “A novel musical chairs algorithm applied for MPPT of PV systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 146, p. 111135, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111135.
- [29] M. Kamran Khan, M. Hamza Zafar, M. Mansoor, A. Feroz Mirza, U. Amir Khan, and N. Mujeeb Khan, “Green energy extraction for sustainable development: A novel MPPT technique for hybrid PV-TEG system,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 53, p. 102388, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102388.
- [30] T. Hai, J. Zhou, and K. Muranaka, “An efficient fuzzy-logic based MPPT controller for grid-connected PV systems by farmland fertility optimization algorithm,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 267, p. 169636, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.IJLEO.2022.169636.
- [31] D. J. K. Kishore, M. R. Mohamed, K. Sudhakar, and K. Peddakapu, “A new meta-heuristic optimization-based MPPT control technique for green energy harvesting from photovoltaic systems under different atmospheric conditions,” *Environ. Sci. Pollut. Res. 2023 3035*, vol. 30, no. 35, pp. 84167–84182, Jun. 2023, doi: 10.1007/S11356-023-28248-8.
- [32] A. Hassan, O. Bass, and M. A. S. Masoum, “An improved genetic algorithm based fractional open circuit voltage MPPT for solar PV systems,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1535–1548, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.EGYR.2022.12.088.
- [33] X. Li, Y. He, and M. Li, “Research on Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control Based on Improved Tuna Swarm Algorithm and Adaptive Perturbation Observation Method,” *Energies 2024, Vol. 17, Page 2985*, vol. 17, no. 12, p. 2985, Jun. 2024, doi: 10.3390/EN17122985.
- [34] C. Rahli *et al.*, “Optimization of Photovoltaic Water Pumping System Using Nutcracker Optimization Algorithm,” *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Electr. Eng. 2025*, pp. 1–22, Apr. 2025, doi: 10.1007/S40998-025-00810-9.
- [35] “IEA – International Energy Agency - IEA.” Accessed: Apr. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- [36] U. Nyambuu and W. Semmler, “Fossil Fuel Resources, Environment, and Climate Change,” *Contrib. to Econ.*, vol. Part F32, pp. 45–58, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-27982-9\_4.
- [37] J. Inumaru, T. Hasegawa, H. Shirai, H. Nishida, N. Noda, and S. Ohyama, “Fossil fuels combustion and environmental issues,” *Adv. Power Boil.*, pp. 1–56, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-820360-6.00001-1.

## Références

- [38] D. J. Soeder, “Fossil Fuels and Climate Change,” *Fracking Environ.*, pp. 155–185, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-59121-2\_9.
- [39] S. Gandomi, M. Barzegar, S. Zolghadri, and M. R. Rahimpour, “The Future of Fossil Fuels Supply and Impacts on Sustainability,” *Encycl. Renew. Energy, Sustain. Environ.*, pp. 121–130, Jan. 2024, doi: 10.1016/B978-0-323-93940-9.00270-X.
- [40] P. Cheekatamarla, K. Gluesenkamp, S. Kowalski, Z. Li, and S. Jajja, “Global Primary Energy Sources and Their Carbon Intensity,” pp. 11–17, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-45365-6\_3.
- [41] P. F. Borowski, “Mitigating Climate Change and the Development of Green Energy versus a Return to Fossil Fuels Due to the Energy Crisis in 2022,” *Energies 2022, Vol. 15, Page 9289*, vol. 15, no. 24, p. 9289, Dec. 2022, doi: 10.3390/EN15249289.
- [42] “Executive summary – Electricity 2024 – Analysis - IEA.” Accessed: Apr. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024/executive-summary>
- [43] T. Kataray *et al.*, “Integration of smart grid with renewable energy sources: Opportunities and challenges – A comprehensive review,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 58, p. 103363, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103363.
- [44] G. S. Chawda, A. G. Shaik, O. P. Mahela, S. Padmanaban, and J. B. Holm-Nielsen, “Comprehensive Review of Distributed FACTS Control Algorithms for Power Quality Enhancement in Utility Grid with Renewable Energy Penetration,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107614–107634, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000931.
- [45] M. Cavazzuti and M. Bottarelli, “Performance analysis of a multi-source renewable energy system for temperature control in buildings of varied thermal transmittance and climate zone,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 187, p. 113725, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.RSER.2023.113725.
- [46] S. Biswas, P. Kumar Roy, and K. Chatterjee, “Renewable Energy-Based Multi-source System Under Deregulated Environment Using COKHA Algorithm,” *IETE J. Res.*, vol. 69, no. 7, pp. 4772–4790, Sep. 2023, doi: 10.1080/03772063.2021.1954099.
- [47] R. Madhana and G. Mani, “Power enhancement methods of renewable energy resources using multiport DC-DC converter: A technical review,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 35, p. 100689, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.SUSCOM.2022.100689.
- [48] X. He, H. Dong, W. Yang, and W. Li, “Multi-Source Information Fusion Technology and Its Application in Smart Distribution Power System,” *Sustain. 2023, Vol. 15, Page 6170*, vol. 15, no. 7, p. 6170, Apr. 2023, doi: 10.3390/SU15076170.
- [49] D. Rekioua, “Power Electronics in Hybrid Renewable Energies Systems,” *Green Energy Technol.*, pp. 39–77, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-34021-6\_2.
- [50] S. Wang, S. Hosseinalipour, and C. G. Brinton, “Multi-Source to Multi-Target Decentralized Federated Domain Adaptation,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 3, pp. 1011–1025, Jun. 2024, doi: 10.1109/TCCN.2024.3352976.
- [51] J. Oyekale, M. Petrollese, V. Tola, and G. Cau, “Impacts of Renewable Energy Resources on Effectiveness of Grid-Integrated Systems: Succinct Review of Current Challenges and Potential Solution Strategies,” *Energies 2020, Vol. 13, Page 4856*, vol. 13, no. 18, p. 4856, Sep. 2020, doi: 10.3390/EN13184856.

- [52] M. Toloo, M. Taghizadeh-Yazdi, and A. Mohammadi-Balani, “Multi-objective centralization-decentralization trade-off analysis for multi-source renewable electricity generation expansion planning: A case study of Iran,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 164, p. 107870, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.CIE.2021.107870.
- [53] A. Gaabour, A. Metatla, R. Kelaiaia, F. Bourennani, and A. Kerboua, “Recent Bibliography on the Optimization of Multi-source Energy Systems,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 809–830, Sep. 2019, doi: 10.1007/S11831-018-9271-6/METRICS.
- [54] T. Li *et al.*, “Performance and PV benefits analysis of multi-source renewable energy systems for different types of buildings on university campus,” *Renew. Energy*, vol. 237, p. 121522, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.RENENE.2024.121522.
- [55] A. Ghasemi-Marzbali, “Multi-area multi-source automatic generation control in deregulated power system,” *Energy*, vol. 201, p. 117667, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.117667.
- [56] M. Aliyu, G. Hassan, S. A. Said, M. U. Siddiqui, A. T. Alawami, and I. M. Elamin, “A review of solar-powered water pumping systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 87, pp. 61–76, May 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.02.010.
- [57] O. V. Shepovalov, A. T. Belenov, and S. V. Chirkov, “Review of photovoltaic water pumping system research,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 306–324, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.EGYR.2020.08.053.
- [58] Q. Al-Yasiri, M. Szabó, and M. Arıcı, “A review on solar-powered cooling and air-conditioning systems for building applications,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2888–2907, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.EGYR.2022.01.172.
- [59] O. Ayadi, B. Rinchi, and F. Alsaleem, “Experimental Evaluation of a Solar-Powered Air Conditioner,” *Sol. Energy*, vol. 272, p. 112466, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.SOLENER.2024.112466.
- [60] M. K. Shahid *et al.*, “A Review of Membrane-Based Desalination Systems Powered by Renewable Energy Sources,” *Water 2023, Vol. 15, Page 534*, vol. 15, no. 3, p. 534, Jan. 2023, doi: 10.3390/W15030534.
- [61] E. T. Sayed *et al.*, “Application of artificial intelligence techniques for modeling, optimizing, and controlling desalination systems powered by renewable energy resources,” *J. Clean. Prod.*, vol. 413, p. 137486, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.137486.
- [62] H.-B. Anita *et al.*, “Green Martin (Orcid ID: 0000-0002-8860-396X) SOLAR CELL EFFICIENCY TABLES (VERSION 54),” vol. 7, 2019, doi: 10.1002/pip.3171.
- [63] R. Abbassi, A. Abbassi, A. A. Heidari, and S. Mirjalili, “An efficient salp swarm-inspired algorithm for parameters identification of photovoltaic cell models,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 179, pp. 362–372, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2018.10.069.
- [64] A. Pedroza-Díaz, P. M. Rodrigo, Ó. Dávalos-Orozco, E. De-la-Vega, and Á. Valera-Albacete, “Review of explicit models for photovoltaic cell electrical characterization,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 207, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.RSER.2024.114979.
- [65] O. I. Olayiwola and P. S. Barendse, “Photovoltaic Cell/Module Equivalent Electric

- Circuit Modeling Using Impedance Spectroscopy,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 2, pp. 1690–1701, Mar. 2020, doi: 10.1109/TIA.2019.2958906.
- [66] WALBURGAHEMETSBERGER;MICHAEL SCHMELA;SONIA DUNLOP, “the Global Market Outlook for Solar Power 2024-2028,” 2024. Accessed: Apr. 16, 2025. [Online]. Available: [https://api.solarpowereurope.org/uploads/Global\\_Market\\_Outlook\\_for\\_Solar\\_Power\\_2024\\_a083b6dcd5.pdf?updated\\_at=2024-06-14T14:43:37.929Z](https://api.solarpowereurope.org/uploads/Global_Market_Outlook_for_Solar_Power_2024_a083b6dcd5.pdf?updated_at=2024-06-14T14:43:37.929Z)
- [67] V. Gautam, S. Khatoon, and M. F. Jalil, “History of Solar PV System and its Recent Development,” *Photovolt. Syst. Technol.*, pp. 1–26, May 2024, doi: 10.1002/9781394167678.CH1.
- [68] R. F. Criollo Enríquez, D. P. Guayllas Domínguez, and D. Ochoa Correa, “Evolución tecnológica de la generación solar fotovoltaica: una revisión de la literatura en la última década,” *Rev. Tecnológica ESPOL*, vol. 36, no. 2, pp. 13–31, Dec. 2024, doi: 10.37815/RTE.V36N2.1158.
- [69] “Solar resource maps & GIS data for 200+ countries | Solargis.” Accessed: Apr. 16, 2025. [Online]. Available: <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=world>
- [70] “Solar resource maps & GIS data for 200+ countries | Solargis.” Accessed: Apr. 16, 2025. [Online]. Available: <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=algeria>
- [71] A. A. Bayod-Rújula, “Solar photovoltaics (PV),” *Sol. Hydrog. Prod. Process. Syst. Technol.*, pp. 237–295, Aug. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-814853-2.00008-4.
- [72] R. E. Neale *et al.*, “The effects of exposure to solar radiation on human health,” *Photochem. Photobiol. Sci.* 2023 225, vol. 22, no. 5, pp. 1011–1047, Mar. 2023, doi: 10.1007/S43630-023-00375-8.
- [73] A. Z. Kouache, A. Djafour, and K. M. S. Benzaoui, “Performance analysis and effective modeling of a solar photovoltaic module based on field tests,” *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 145–154, Feb. 2024, doi: 10.1515/IJEEPS-2023-0338/MACHINEREADABLECITATION/RIS.
- [74] R. J. Mustafa, M. R. Gomaa, M. Al-Dhaifallah, and H. Rezk, “Environmental Impacts on the Performance of Solar Photovoltaic Systems,” *Sustainability*, vol. 12, no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/SU12020608.
- [75] P. Breeze, “Types of Solar Cells,” *Sol. Power Gener.*, pp. 57–70, 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-804004-1.00009-9.
- [76] H. Soonmin, Hardani, P. Nandi, B. S. Mwankemwa, T. D. Malevu, and M. I. Malik, “Overview on Different types of Solar Cells: An Update,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/APP13042051.
- [77] N. Shah *et al.*, “A Review of Third Generation Solar Cells,” *Processes*, vol. 11, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.3390/PR11061852.
- [78] B. Salhi, “The Photovoltaic Cell Based on CIGS: Principles and Technologies,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/MA15051908.
- [79] C. Cavallo, F. Di Pascasio, A. Latini, M. Bonomo, and D. Dini, “Nanostructured

- Semiconductor Materials for Dye-Sensitized Solar Cells,” *J. Nanomater.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/5323164.
- [80] D. Wu *et al.*, “Influence of Lamination Conditions of EVA Encapsulation on Photovoltaic Module Durability,” *Mater. 2023, Vol. 16, Page 6945*, vol. 16, no. 21, p. 6945, Oct. 2023, doi: 10.3390/MA16216945.
- [81] W. T. Chong *et al.*, “Encapsulant Materials and Their Adoption in Photovoltaic Modules: A Brief Review,” *Sustain. 2023, Vol. 15, Page 9453*, vol. 15, no. 12, p. 9453, Jun. 2023, doi: 10.3390/SU15129453.
- [82] R. Chouaib, M. Ouada, M. A. Ryad, and S. Saad, “Improved direct control of single stage photovoltaic powred system,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 36, no. 3, pp. 1389–1399, Dec. 2024, doi: 10.11591/IJEECS.V36.I3.PP1389-1399.
- [83] E. Mamarelis, G. Petrone, and G. Spagnuolo, “A two-steps algorithm improving the P&O steady state MPPT efficiency,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 414–421, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.APENERGY.2013.07.022.
- [84] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, “Assessment of the incremental conductance maximum power point tracking algorithm,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 108–117, 2013, doi: 10.1109/TSTE.2012.2202698.
- [85] C. H. Basha and C. Rani, “Different Conventional and Soft Computing MPPT Techniques for Solar PV Systems with High Step-Up Boost Converters: A Comprehensive Analysis,” *Energies 2020, Vol. 13, Page 371*, vol. 13, no. 2, p. 371, Jan. 2020, doi: 10.3390/EN13020371.
- [86] C. L. Liu, J. H. Chen, Y. H. Liu, and Z. Z. Yang, “An Asymmetrical Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems,” *Energies 2014, Vol. 7, Pages 2177-2193*, vol. 7, no. 4, pp. 2177–2193, Apr. 2014, doi: 10.3390/EN7042177.
- [87] Ruchira, R. N. Patel, and S. K. Sinha, “Comparison of ANN-Based MPPT Controller and Incremental Conductance for Photovoltaic System,” *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 476, pp. 295–305, 2019, doi: 10.1007/978-981-10-8234-4\_26.
- [88] C. Rahli *et al.*, “PV Systems Operating in Dynamic Climatic Circumstances Using a PSO-Based SMC and PID Controller,” *2024 2nd Int. Conf. Electr. Eng. Autom. Control. ICEEAC 2024*, 2024, doi: 10.1109/ICEEAC61226.2024.10576441.
- [89] Q. Hu, S. Hu, and M. Liu, “A Multi-Objective Nutcracker Optimization Algorithm Based on Cubic Chaotic Map for Numerical Association Rule Mining,” *Appl. Sci. 2025, Vol. 15, Page 1611*, vol. 15, no. 3, p. 1611, Feb. 2025, doi: 10.3390/APP15031611.
- [90] M. Abdel-Basset, R. Mohamed, M. Jameel, and M. Abouhawwash, “Nutcracker optimizer: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization and engineering design problems,” *Knowledge-Based Syst.*, vol. 262, p. 110248, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.KNOSYS.2022.110248.
- [91] M. Y. A. Khan, H. Liu, Z. Yang, and X. Yuan, “A Comprehensive Review on Grid Connected Photovoltaic Inverters, Their Modulation Techniques, and Control Strategies,” *Energies*, vol. 13, no. 16, p. 4185, Aug. 2020, doi: 10.3390/EN13164185.
- [92] F. Marignetti, R. L. Di Stefano, G. Rubino, and R. Giacomobono, “Current Source Inverter (CSI) Power Converters in Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review

- of Performance, Control, and Integration,” *Energies*, vol. 16, no. 21, Oct. 2023, doi: 10.3390/EN16217319.
- [93] K. Zeb *et al.*, “A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, pp. 1120–1141, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.06.053.
- [94] V. Jagan *et al.*, “Analysis of Different PWM Techniques for Enhanced Ultrahigh Gain Z-Network Topology,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2024, no. 1, p. 6645798, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/6645798.
- [95] I. Chaib *et al.*, “Design and implementation of a discontinuous SVM applied for a quasi Z-source inverter with power loss reduction,” *J. Power Electron.*, vol. 24, no. 10, pp. 1584–1595, Oct. 2024, doi: 10.1007/S43236-024-00824-2/METRICS.
- [96] W. Liang, Y. Liu, B. Ge, and H. Abu-Rub, “Investigation on pulse-width amplitude modulation-based single-phase quasi-Z-source photovoltaic inverter,” *Iet Power Electron.*, vol. 10, no. 14, pp. 1810–1818, Nov. 2017, doi: 10.1049/IET-PEL.2016.0593.
- [97] A. Gnanasaravanan, A. Jeyaprakash, J. J. Gnanachandran, P. Annapandi, A. Ravi, and S. Selvakumar, “Improved Series Z Source Inverter for PV System Using SVPWM Technique,” *Proc. 5th Int. Conf. Trends Electron. Informatics, ICOEI 2021*, pp. 335–341, Jun. 2021, doi: 10.1109/ICOEI51242.2021.9453059.
- [98] L. Monjo, L. Sainz, J. J. Mesas, and J. Pedra, “Quasi-Z-Source Inverter-Based Photovoltaic Power System Modeling for Grid Stability Studies,” *Energies 2021, Vol. 14, Page 508*, vol. 14, no. 2, p. 508, Jan. 2021, doi: 10.3390/EN14020508.
- [99] Y. Liu, B. Ge, H. Abu-Rub, and F. Z. Peng, “An effective control method for quasi-Z-source cascade multilevel inverter-based grid-tie single-phase photovoltaic power system,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 399–407, Feb. 2014, doi: 10.1109/TII.2013.2280083.
- [100] N. Sabeur, S. Mekhilef, and A. Masaoud, “A Simplified Time-Domain Modulation Scheme-Based Maximum Boost Control for Three-Phase Quasi-Z Source Inverters,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 2, pp. 760–769, Jun. 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2763974.
- [101] L. Monjo, L. Sainz, J. J. Mesas, and J. Pedra, “State-Space Model of Quasi-Z-Source Inverter-PV Systems for Transient Dynamics Studies and Network Stability Assessment,” *Energies 2021, Vol. 14, Page 4150*, vol. 14, no. 14, p. 4150, Jul. 2021, doi: 10.3390/EN14144150.
- [102] N. Boutasseta, M. S. Bouakkaz, N. Fergani, I. Attoui, A. Bouraiou, and A. Neçaibia, “Experimental Evaluation of Moth-Flame Optimization Based GMPPT Algorithm for Photovoltaic Systems Subject to Various Operating Conditions,” *Appl. Sol. Energy (English Transl. Geliotekhnika)*, vol. 58, no. 1, pp. 1–14, Feb. 2022, doi: 10.3103/S0003701X22010121/METRICS.
- [103] Y. A. Ahmed, A. Rashid, and M. M. Khurshid, “Investigating the Determinants of the Adoption of Solar Photovoltaic Systems—Citizen’s Perspectives of Two Developing Countries,” *Sustain.*, vol. 14, no. 18, p. 11764, Sep. 2022, doi: 10.3390/SU141811764/S1.

## Références

- [104] L. Korcaj, U. J. J. Hahnel, and H. Spada, “Intentions to adopt photovoltaic systems depend on homeowners’ expected personal gains and behavior of peers,” *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 407–415, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.RENENE.2014.10.007.
- [105] V. Rai, D. C. Reeves, and R. Margolis, “Overcoming barriers and uncertainties in the adoption of residential solar PV,” *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 498–505, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.RENENE.2015.11.080.
- [106] E. Mammeri *et al.*, “An enhanced battery model using a hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization,” *Electr. Eng.*, vol. 105, no. 6, pp. 4525–4548, Dec. 2023, doi: 10.1007/S00202-023-01996-Z/METRICS.
- [107] E. Mammeri, A. Ahriche, A. Necaibia, A. Bouraiou, A. Ziane, and S. Lachtar, “A Global MPPT Controller Based on an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm,” *Lect. Notes Networks Syst.*, vol. 591 LNNS, pp. 281–288, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-21216-1\_30.
- [108] A. Refaat *et al.*, “Extraction of maximum power from PV system based on horse herd optimization MPPT technique under various weather conditions,” *Renew. Energy*, vol. 220, p. 119718, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.RENENE.2023.119718.
- [109] M. E. Girgis and N. A. Elkhateeb, “Enhancing photovoltaic MPPT with P&O algorithm performance based on adaptive PID control using exponential forgetting recursive least squares method,” *Renew. Energy*, vol. 237, p. 121801, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.RENENE.2024.121801.
- [110] V. Balaji and A. Peer Fathima, “Hybrid algorithm for MPPT tracking using a single current sensor for partially shaded PV systems,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 53, p. 102415, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102415.
- [111] A. Derdar *et al.*, “Photovoltaic energy generation systems monitoring and performance optimization using wireless sensors network and metaheuristics,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 35, p. 100684, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.SUSCOM.2022.100684.
- [112] M. Yaichi, A. Tayebi, A. Boutadara, A. Bekraoui, and A. Mammeri, “Monitoring of PV systems installed in an extremely hostile climate in southern Algeria: Performance evaluation extended to degradation assessment of various PV panel of single-crystalline technologies,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 279, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.116777.
- [113] M. Yaichi, A. Tayebi, A. Mammeri, and A. Boutadara, “Performance of a PV field’s discontinuous two-position sun tracker systems supplying a water pumping system: Concept, theoretical and experimental studies – A case study of the Adrar area in Algeria’s Sahara,” *Renew. Energy*, vol. 201, pp. 548–562, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.10.095.
- [114] M. Errouha, A. Derouich, S. Motahhir, O. Zamzoum, N. El Ouanjli, and A. El Ghzizal, “Optimization and control of water pumping PV systems using fuzzy logic controller,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 853–865, 2019, doi: 10.1016/j.egy.2019.07.001.
- [115] I. Saady, M. Karim, B. Bossoufi, N. El Ouanjli, S. Motahhir, and B. Majout, “Optimization and control of photovoltaic water pumping system using kalman filter based MPPT and multilevel inverter fed DTC-IM,” *Results Eng.*, vol. 17, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100829.

## Références

- [116] R. Abbassi and S. Saidi, “Design of a Novel Chaotic Horse Herd Optimizer and Application to MPPT for Optimal Performance of Stand-Alone Solar PV Water Pumping Systems,” *Math. 2024, Vol. 12, Page 594*, vol. 12, no. 4, p. 594, Feb. 2024, doi: 10.3390/MATH12040594.
- [117] Z. Duan, H. Yu, Q. Zhang, and L. Tian, “Parameter Extraction of Solar Photovoltaic Model Based on Nutcracker Optimization Algorithm,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 11, 2023, doi: 10.3390/app13116710.