



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira –

Faculté des sciences appliquées

Département de génie électrique

Mémoire de fin d'études en vue de
L'obtention du diplôme :
MASTER

Domaine : Science et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème

**Amélioration de la Qualité de L'énergie électrique
par des Convertisseurs Statiques Associés aux
Générateurs Photovoltaïques**

Présenté par :

Galoul Karim

Devant le jury composé de :

Président : Mr.M.Touafek

Encadreur : Griche Issam

Examineurs : Mr.S.Mouassa

Soutenu le : 26/06/2026

2025/2026



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Bouira, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie électrique



Bouira le :15/06/2026

Autorisation de soutenance d'un mémoire de Master

Je soussigné(e), l'enseignant (e) : GRICHE Issam.....

Encadreur des étudiants (es) :

1-.....GALOUL Karim.....

2-...../.....

Spécialité : Electrotechnique Industrielle (EI).....

Les autorise à soutenir leur **mémoire** de Master.

Signature du rapporteur

Dédicaces

À mes très chers parents,
À ma famille,
À mes amis...

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Département Génie Électrique, Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Bouira.

Je tiens à remercier, en premier lieu, M. le Dr.Issam Griche , Directeur de ce mémoire.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

Mr.M.Touafek

Mr.S.Moussa

Mr.I.Griche

Enfin, j'associe à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.

Résumé

Ce mémoire présente l'étude et la modélisation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique. Le travail porte sur le générateur photovoltaïque, le convertisseur Boost, les techniques MPPT ainsi que les onduleurs à deux et à trois niveaux (NPC). Une comparaison entre l'algorithme P&O et la logique floue (FLC) est réalisée afin d'améliorer l'extraction de la puissance maximale et la qualité de l'énergie injectée au réseau. Les résultats de simulation sous MATLAB/Simulink montrent que la commande par logique floue associée à un onduleur NPC offre un meilleur rendement et une réduction significative du taux de distorsion harmonique (THD).

Mots clés : Photovoltaïque, MPPT, Logique floue, P&O, Onduleur NPC, THD.

Abstract

This thesis presents the modeling and analysis of a grid-connected photovoltaic system. The study focuses on the photovoltaic generator, the Boost converter, MPPT techniques, and both two-level and three-level (NPC) inverters. A comparison between the Perturb and Observe (P&O) algorithm and Fuzzy Logic Control (FLC) is carried out to improve maximum power extraction and power quality. MATLAB/Simulink simulation results show that the Fuzzy Logic controller combined with the NPC inverter provides higher efficiency and significantly reduces Total Harmonic Distortion (THD).

Keywords : Photovoltaic, MPPT, Fuzzy Logic, P&O, NPC Inverter, THD

****الملخص****

تتناول هذه المذكرة دراسة ونمذجة نظام كهروضوئي متصل بالشبكة الكهربائية، مع التركيز على المولد الكهروضوئي ومحول الرفع (Boost)، وتقنيات تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT)، إضافة إلى مقارنة أداء العاكسين ثنائي وثلاثي المستويات (NPC). كما تمت مقارنة خوارزمية الاضطراب والملاحظة (P&O) بخوارزمية المنطق الضبابي بهدف تحسين استخلاص القدرة القصوى والارتقاء بجودة الطاقة المحقونة في الشبكة. وقد أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink أن اعتماد المنطق الضبابي مع العاكس ثلاثي المستويات (NPC) يحقق كفاءة أعلى ويخفض بشكل ملحوظ نسبة التشوه التوافقي الكلي (THD).

الكلمات المفتاحية : الطاقة الكهروضوئية, MPPT, المنطق الضبابي

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Introduction Générale	1
1 État de l'art	2
Introduction	2
1.1 Le Système Photovoltaïque et son Intégration au Réseau	3
1.1.1 Le Générateur Photovoltaïque (GPV)	3
1.1.1.1 Qu'est-ce que le photovoltaïque ?	3
1.1.1.2 Principe de la conversion photovoltaïque	3
1.1.1.3 Modélisation de la cellule et du panneau PV	4
a Modèle à une diode	4
b Modèle à deux diodes	5
c Modélisation du panneau photovoltaïque	5
1.1.1.4 Influence des conditions environnementales	6
a Influence de l'Irradiation Solaire (G)	6
b Influence de la Température de la Cellule (T)	6
c Facteurs de Pertes Additionnels	6
1.1.2 La Commande MPPT	7
1.1.2.1 Nécessité de l'extraction de la puissance maximale	7
1.1.2.2 Algorithmes MPPT conventionnels	8
a Perturbation et Observation (P&O)	8

V

2.6	Filtre, Micro-Réseau et Réseau	29
2.6.1	Filtre LC : Dimensionnement et Rôle	29
2.6.2	Charges Triphasées Intermittentes	30
2.6.3	Réseau Électrique : Source Idéale (Infinite Bus).....	30
2.7	Conclusion.....	31
3	Résultats et discussion	32
	Introduction.....	32
3.1	Description du système de simulation.....	32
3.1.1	Paramètres de simulation.....	32
3.1.2	Modèle Simulink du système	33
3.2	Optimisation du MPPT : Comparaison P&O vs Logique Floue	33
3.2.1	Résultats de l'algorithme P&O	33
3.2.2	Résultats de l'algorithme à Logique Floue	34
3.2.3	Analyse comparative des algorithmes MPPT	35
3.3	Amélioration de la qualité de l'énergie par onduleur multiniveaux	36
3.3.1	Description des onduleurs étudiés	36
3.3.2	Performances de l'onduleur deux niveaux.....	37
3.3.3	Performances de l'onduleur trois niveaux	39
3.3.4	Comparaison détaillée des deux onduleurs.....	41
3.4	Synthèse globale des améliorations	42
3.5	Discussion générale	42
3.5.1	Interprétation physique des résultats MPPT.....	42
3.5.2	Interprétation des résultats de l'onduleur.....	42
3.5.3	Conformité aux normes internationales	43
	Conclusion du chapitre	43
	Conclusion Générale	44
	Références	46

Table des figures

1.1	Schéma d'un système photovoltaïque [30]	3
1.2	Figure 1. A p-n junction PV cell	4
1.3	Influence de l'irradiation solaire sur les caractéristiques P(V) d'une cellule PV	6
1.4	Influence de la température sur les caractéristiques P(V) d'une cellule PV	7
1.5	Principe de fonctionnement du convertisseur Boost : (a) phase d'accumulation (interrupteur fermé), (b) phase de transfert (interrupteur ouvert) [32].	11
2.1	Effets de l'irradiation et de la température sur les courbes caractéristiques d'un panneau photovoltaïque : (a) Influence de l'irradiation G , (b) Influence de la température T [8][11].	22
2.2	Schéma de principe du convertisseur DC-DC Boost (hacheur série) [31].	23
2.3	Organigramme de l'algorithme de poursuite MPPT par Perturbation et Observation (P&O) [14].	24
2.4	Schéma d'un onduleur triphasé à IGBT [31].	28
2.5	Structure d'une SRF-PLL [27].	29
3.1	Schéma général du modèle Simulink du système photovoltaïque	33
3.2	Évolution de la puissance, la tension et le courant (P&O)	34
3.3	Évolution de la puissance avec l'algorithme MPPT flou	35
3.4	Schéma Simulink de l'onduleur deux niveaux	36
3.5	Schéma Simulink de l'onduleur trois niveaux NPC	37
3.6	Forme d'onde du courant (2 niveaux - avant filtrage)	38
3.7	Analyse FFT (2 niveaux - avant filtrage, THD = 38.66%)	38
3.8	Forme d'onde du courant (2 niveaux - après filtrage)	39
3.9	Analyse FFT (2 niveaux - après filtrage, THD = 2.82%)	39
3.10	Forme d'onde du courant (3 niveaux - avant filtrage)	40
3.11	Analyse FFT (3 niveaux - avant filtrage, THD = 10.07%)	40
3.12	Forme d'onde du courant (3 niveaux - après filtrage)	41
3.13	Analyse FFT (3 niveaux - après filtrage, THD = 0.94%)	41

Liste des tableaux

1	Liste des symboles utilisés dans le mémoire (Partie 1).....	x
2	Liste des symboles utilisés dans le mémoire (Partie 2).....	xi
1.1	Comparaison des performances techniques des algorithmes MPPT conventionnels.....	9
1.2	Synthèse comparative des méthodes MPPT intelligentes.	10
2.1	Résumé des équations fondamentales du modèle à une diode	19
2.2	Résumé des équations fondamentales du modèle à une diode	21
2.3	Coefficients de température pour le module Kyocera KC200GT [5]	22
2.4	Paramètres du convertisseur Boost	24
2.5	Caractéristiques de l’algorithme P&O	25
2.6	Comparaison P&O vs FLC [16][24]	26
2.7	Correspondance entre ensembles flous et codes numériques pour la programmation	26
2.8	Matrice des règles du contrôleur flou pour MPPT.....	27
2.9	États d’un bras d’onduleur [27].....	27
2.10	Caractéristiques de la commande par hystérésis [29].....	27
2.11	Paramètres typiques de la PLL [27]	28
2.12	Paramètres typiques du filtre LC [27]	29
2.13	Paramètres des charges triphasées [30]	30
2.14	Caractéristiques du réseau idéal (Infinite Bus) [27]	31
3.1	Paramètres généraux de simulation	32
3.2	Résultats de l’algorithme MPPT P&O	34
3.3	Résultats de l’algorithme MPPT flou	35
3.4	Comparaison P&O vs Logique Floue	35
3.5	Résultats de l’onduleur deux niveaux	37
3.6	Résultats de l’onduleur trois niveaux.....	40
3.7	Comparaison complète des deux onduleurs.....	42
3.8	Synthèse des améliorations (valeur absolue et relative)	42

3.9	Conformité aux normes internationales de qualité d'énergie	43
-----	--	----

Symbole	Signification	Unité
Grandeurs photovoltaïques		
G	Irradiation solaire	W/m^2
T	Température de la cellule	K (ou $^{\circ}C$)
I_{pv}	Courant de sortie du panneau	A
V_{pv}	Tension aux bornes du panneau	V
I_{ph}	Courant photo-généré	A
I_0	Courant de saturation inverse de la diode	A
V_{oc}	Tension en circuit ouvert	V
I_{sc}	Courant de court-circuit	A
P_{max}	Puissance maximale	W
q	Charge élémentaire	C
k	Constante de Boltzmann	J/K
a	Facteur d'idéalité de la diode	–
R_s	Résistance série	Ω
R_{sh}	Résistance shunt	Ω
Grandeurs du convertisseur Boost		
V_{in}	Tension d'entrée	V
V_{out}	Tension de sortie	V
D	Rapport cyclique	–
f_s	Fréquence de découpage	Hz
L	Inductance	H
C	Capacité	F
Grandeurs MPPT		
$P(k)$	Puissance à l'instant k	W
ΔP	Variation de puissance	W
ΔV	Variation de tension	V
V_{ref}	Tension de référence	V
V_{mp}	Tension au point MPP	V
I_{mp}	Courant au point MPP	A

TABLE 1 – Liste des symboles utilisés dans le mémoire (Partie 1)

Symbole	Signification	Unité
Grandeurs de l'onduleur et de la PLL		
V_{dc}	Tension du bus DC	V
V_{a0}	Tension de phase	V
i_a, i_b, i_c	Courants triphasés	A
θ	Angle du réseau	rad
ω	Pulsation du réseau	rad/s
V_d	Composante directe	V
V_q	Composante quadrature	V
Grandeurs du filtre LC		
L_f	Inductance du filtre	H
C_f	Capacité du filtre	F
f_{res}	Fréquence de résonance	Hz
THD	Distorsion harmonique	$\%$
Normes		
<i>IEEE 519</i>	Contrôle harmonique	–
<i>EN 50160</i>	Qualité d'énergie	–

TABLE 2 – Liste des symboles utilisés dans le mémoire (Partie 2)

Introduction Générale

L'énergie est devenue une préoccupation majeure à l'échelle mondiale ces dernières années, en raison de la demande croissante en électricité et des problèmes environnementaux liés à la combustion des énergies fossiles. C'est pourquoi la transition vers les énergies renouvelables s'est imposée comme une évidence. Parmi ces sources figure l'énergie solaire photovoltaïque, qui s'inscrit dans les progrès mondiaux en matière de simplicité d'utilisation, de disponibilité.

L'utilisation du photovoltaïque dans le réseau électrique présente toutefois certains défis. En effet, cette technologie est fortement dépendante d'éléments naturels tels que l'ensoleillement et la température. De ce fait, sa production d'énergie peut être irrégulière. Maintenir l'équilibre du réseau électrique s'avère donc complexe, car l'offre et la consommation d'énergie doivent toujours être égales.

Cela permet également la connexion de ces dispositifs au réseau électrique par l'intermédiaire d'équipements électroniques connus sous le nom de convertisseurs ou de commutateurs inverses, qui transforment le courant continu (CC) délivré par les panneaux solaires en courant alternatif (CA). Les convertisseurs jouent un rôle très important dans ces systèmes, car ils effectuent une adaptation de la tension et de la fréquence au réseau.

Cependant, en présence d'une charge non linéaire dans certains cas, ces appareils pourraient être source de problèmes liés à la qualité de l'énergie. Les problèmes concernent le plus souvent les harmoniques, la puissance réactive, les variations de tension, et même dans certains cas, les déséquilibres de phase. Tous ces phénomènes peuvent se traduire par une hausse des pertes de réseau, la surchauffe des matériels et leur diminution de durée de vie.

C'est ainsi qu'il a devenu impératif de trouver des solutions pour améliorer la qualité de l'énergie lors de l'intégration des systèmes photovoltaïques. Dans ce chapitre, nous allons examiner les problèmes qui sont les plus importants, puis nous donnerons les solutions qui peuvent aider à résoudre ces problèmes tels que les méthodes de filtrage, la compensation de la puissance réactive et les méthodes de contrôle moderne de transformateurs, afin d'améliorer les performances du réseau et d'assurer sa stabilité.

1 État de l'art

Introduction

L'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) dans les réseaux électriques constitue aujourd'hui une réponse majeure aux enjeux énergétiques et environnementaux. Toutefois, cette intégration soulève plusieurs défis techniques liés à la fois à la nature intermittente de la source solaire, à la faible tension délivrée par les panneaux, ainsi qu'à la qualité de l'énergie injectée dans le réseau. Ce premier chapitre a pour objectif de présenter les différents composants et concepts nécessaires à la compréhension et à la modélisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque connectée au réseau, en mettant un accent particulier sur l'optimisation de son rendement et sur la maîtrise de la qualité de l'énergie électrique.

Dans un premier temps, nous décrirons le générateur photovoltaïque (GPV), en expliquant son principe de fonctionnement physique, sa modélisation électrique, ainsi que l'influence des conditions environnementales (irradiation, température, ombrage) sur ses performances. Ensuite, nous aborderons la nécessité d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour extraire en permanence la puissance maximale disponible. Les algorithmes conventionnels (P&O, IncCond, tension fractionnaire) et les méthodes intelligentes (logique floue, réseaux de neurones, PSO) seront présentés et comparés.

Nous nous intéresserons ensuite au convertisseur Boost, qui constitue l'étage d'adaptation entre le générateur PV et l'onduleur. Son principe de fonctionnement, sa modélisation et ses stratégies de commande seront analysés. Enfin, ce chapitre se conclura par une réflexion sur la qualité de l'énergie électrique, en définissant les principales perturbations (harmoniques, creux de tension, flicker) et en présentant des solutions de filtrage, avec un accent particulier sur le filtre actif parallèle (FAP), qui permet d'améliorer significativement la sinusoïdalité du courant injecté dans le réseau.

1.1 Le Système Photovoltaïque et son Intégration au Réseau

1.1.1 Le Générateur Photovoltaïque (GPV)

1.1.1.1 Qu'est-ce que le photovoltaïque ?

La technologie dite photovoltaïque se contente de transformer, selon les besoins apparents, l'énergie lumineuse émise, de façon continue, que ce soit en watts ou en kilowatts, en utilisée pour alimenter un cycle électrique. Les semi-conducteurs, pour leur part, sont pénalisés par la mode d'énergie lumineuse qu'ils doivent capter puis transformer en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques constitutives de cette technologie, sans lesquelles rien ne se produit, sont, dans le temps où l'on peut réaliser la transformation, sans dépendre d'un apport de lumière de synthèse. La lumière naturelle constitue la seule source de lumière disponible mais s'avère toutefois indispensable pour initier la génération en l'absence de laquelle tout s'arrête, sans qu'elles exigent une moindre recharge, comme le cas des batteries. [1]

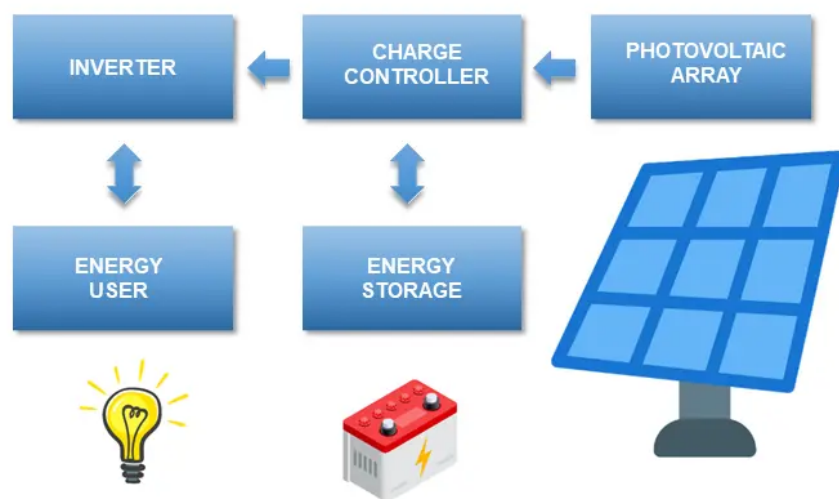


FIGURE 1.1 – Schéma d'un système photovoltaïque [30]

1.1.1.2 Principe de la conversion photovoltaïque

La technologie photovoltaïque s'implante sur l'utilisation de l'énergie lumineuse et donc la production d'électricité en continu, mesurée en watts ou en kilowatts (une puissance de 1kw pour une cellule donnée ou un capteur donné tant que la lumière éclaire ce premier maillon de la chaîne, la cellule photovoltaïque). Pas de lumière, pas de production d'énergie. Ces cellules solaires sont différentes des batteries, car elles ne nécessitent aucune recharge.[2]

Les photopiles photovoltaïques, tout comme celles de la description de la cellule photovoltaïque, sont basées sur le principe de l'effet photovoltaïque qui repose sur une séquence d'étapes telles que décrites ci-après.

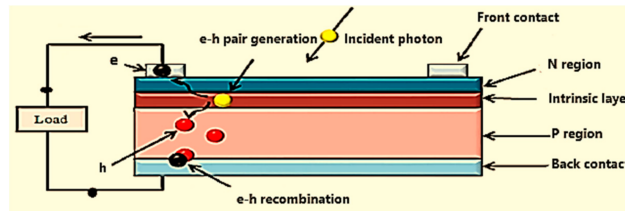


FIGURE 1.2 – Figure 1. A p-n junction PV cell

Un semi-conducteur à hétérojonction p-n qui absorbe un photon génère, en retour, des porteurs de charge de type paire électron-trou. L'absorption d'un photon de fréquence ν d'énergie $E = h\nu$, fondamentale pour l'excitation du porteur, doit excéder la valeur de la bande interdite ($E = h\nu > E_g$) de ce semi-conducteur dopé. Cela permet de transférer une partie de l'énergie E à l'électron prélevé de la bande de valence E_v vers la bande de conduction E_c (voir figure 1). Ce faisant, il crée un vide (ou un trou) au niveau de la bande de valence. Issu de la lumière, l'électron ou le trou récupère, en plus de l'énergie du photon ($h\nu - E_g$), une énergie cinétique $h\nu_0$ facilement évaluée comme l'énergie seuil fonction de travail du semi-conducteur.

Dans un circuit solaire relié extérieurement, les trous sont éjectés hors de la jonction par la région p, alors que les électrons se propagent dans la région n pour d'abord conduire le circuit, puis se recombiner avec les trous.

Au final les électrons séparés peuvent alimenter le circuit. Après avoir traversé le circuit, les électrons se recombinent avec les trous.

Il faut concevoir le type n plus mince que le type p. Ainsi, les électrons peuvent traverser rapidement le circuit et créer un courant avant de se recombiner avec les trous. De plus, un traitement anti-reflet est mis en œuvre sur la couche n pour éliminer les réflexions due à la surface et favoriser ainsi la transmission de la lumière à l'intérieur de la couche semiconductrice.

Ces différents éléments seront étudiés plus en détail dans la suite du texte.[2]

1.1.1.3 Modélisation de la cellule et du panneau PV

a Modèle à une diode

Le modèle à une diode constitue l'approche la plus utilisée pour représenter le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque. Il repose sur un circuit équivalent composé de quatre éléments fondamentaux : une source de courant I_{ph} , proportionnelle à l'irradiation solaire incidente, représentant le courant photo-généré ; une diode modélisant la jonction PN de la cellule ; une résistance série R_s , traduisant les pertes ohmiques internes ; une résistance parallèle R_{sh} , représentant les courants de fuite à travers la jonction. Le comportement courant-tension de la cellule est décrit par l'équation non

linéaire suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{nV_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

où I_0 est le courant de saturation de la diode, n le facteur d'idéalité et V_T la tension thermique. Cette équation étant implicite et fortement non linéaire, sa résolution analytique directe est difficile. Par conséquent, des méthodes numériques telles que l'algorithme de Newton-Raphson sont généralement employées pour déterminer le courant de sortie [4], [5]. En raison de sa simplicité relative et de sa précision satisfaisante, ce modèle est largement adopté dans les applications industrielles et les outils de simulation des systèmes photovoltaïques [6].

b Modèle à deux diodes

Afin d'améliorer la précision du modèle, notamment dans des conditions de faible irradiance, le modèle à deux diodes introduit une seconde diode pour prendre en compte les phénomènes de recombinaison dans la zone de charge d'espace. L'expression mathématique correspondante est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{n_1 V_T} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{n_2 V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

Ce modèle permet une reproduction plus fidèle des caractéristiques expérimentales de la cellule photovoltaïque. Toutefois, il nécessite l'identification d'un nombre plus important de paramètres, ce qui augmente la complexité du processus de modélisation et de calcul [5], [7].

c Modélisation du panneau photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules interconnectées :

- en série afin d'augmenter la tension ;
- en parallèle afin d'augmenter le courant.

Les relations fondamentales sont données par :

$$V_{module} = N_s \cdot V_{cell}, \quad I_{module} = N_p \cdot I_{cell} \quad (1.3)$$

où N_s et N_p représentent respectivement le nombre de cellules en série et en parallèle.

Les équations du modèle de cellule sont étendues au module en tenant compte de ces configurations, permettant ainsi de modéliser le comportement global du générateur photovoltaïque [4].

1.1.1.4 Influence des conditions environnementales

a Influence de l'Irradiation Solaire (G)

L'irradiation solaire, mesurée en W/m^2 , détermine le flux de photons frappant la surface de la cellule. Son impact est principalement observé sur le courant produit.

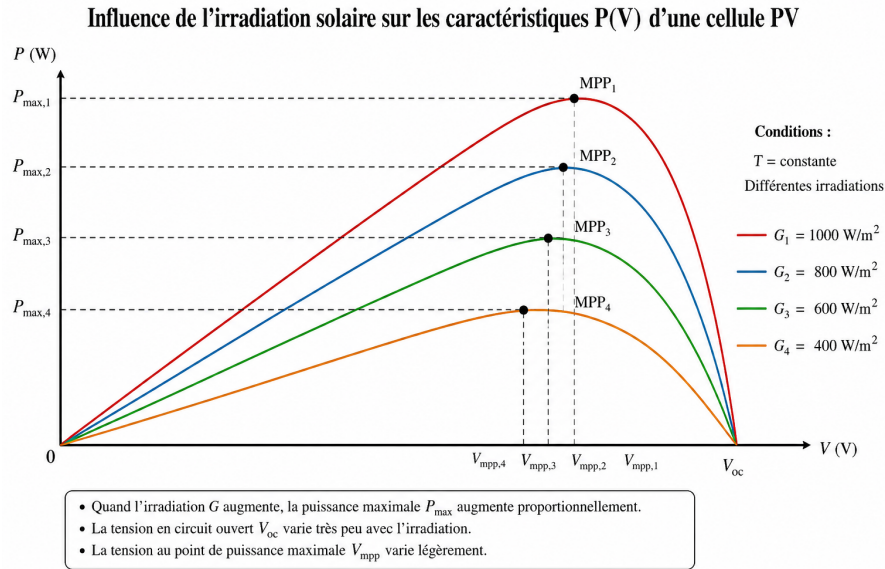


FIGURE 1.3 – Influence de l'irradiation solaire sur les caractéristiques P(V) d'une cellule PV

b Influence de la Température de la Cellule (T)

La température agit comme un facteur de dégradation thermique sur les performances du semi-conducteur :

- **Chute de la tension (V) :** C'est l'impact le plus pénalisant. L'élévation de la température réduit la largeur de la bande interdite, ce qui augmente le courant de saturation inverse. Il en résulte une diminution de la tension V_{oc} , estimée entre $-0,3\%$ et $-0,5\%$ par degré Celsius pour le silicium cristallin [8] [10].
- **Effet sur le courant et la puissance :** Bien que la chaleur favorise une très légère augmentation du courant I_{sc} , ce gain est largement compensé par la perte de tension. Par conséquent, la puissance maximale ($P_{\max}$) diminue globalement lorsque la température de la cellule dépasse les conditions standards (25°C) [10].

c Facteurs de Pertes Additionnels

D'autres phénomènes environnementaux peuvent limiter drastiquement l'énergie utile :

- **Ombrage Partiel et Points Chauds :** Lorsqu'une partie du module est masquée (nuages, obstacles, salissures), les cellules non éclairées peuvent se comporter comme des récepteurs de charge. Cette dissipation d'énergie sous forme de chaleur peut engendrer des points chauds

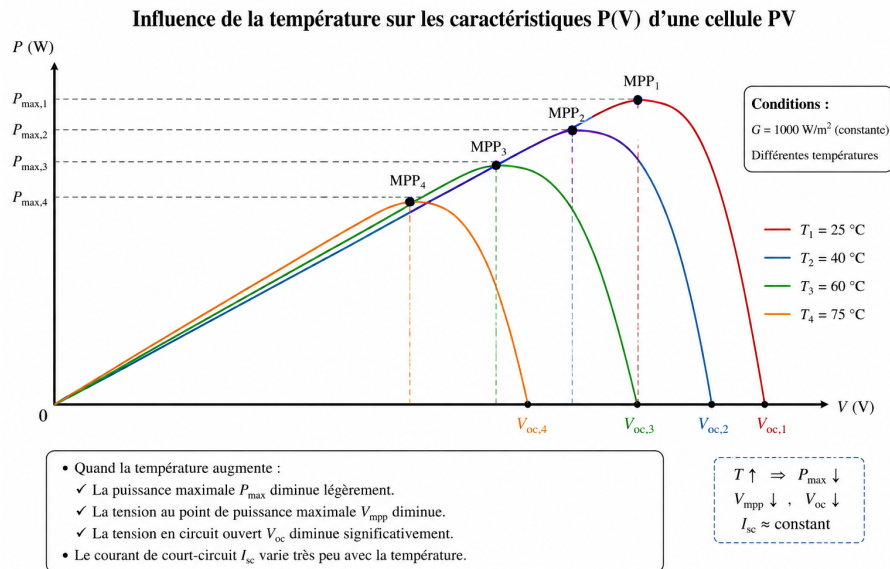


FIGURE 1.4 – Influence de la température sur les caractéristiques P(V) d'une cellule PV

(*hot-spots*) susceptibles d'endommager irrémédiablement le panneau [9].

- **Effet de l'Encrassement (Soiling)** : L'accumulation de poussière, de sable ou de polluants atmosphériques crée une barrière physique. Cela réduit la transmittance du verre de protection, diminuant ainsi l'énergie photonique effective atteignant la jonction PN [11].
- **Sensibilité Spectrale** : La performance dépend également de la répartition spectrale de la lumière (Masse d'Air - AM), qui varie selon la position du soleil au cours de la journée [12].

1.1.2 La Commande MPPT

1.1.2.1 Nécessité de l'extraction de la puissance maximale

La question de l'extraction de la puissance maximale (PEM) est une problématique de première importance en ingénierie des systèmes photovoltaïques car elle représente une importante contrainte physique : un générateur photovoltaïque (GPV) ne peut être considéré comme une source à tension constante mais plutôt comme une source à comportement non-linéaire et à capacité de transfert instantanément variable.

La Nature Non Linéaire du Générateur PV : Contrairement à une alimentation stabilisée, la puissance P délivrée par un panneau solaire dépend de la tension V imposée à ses bornes. La caractéristique $P(V)$ présente une forme de cloche avec un sommet unique, le Point de Puissance Maximale (PPM). Inadaptation par couplage direct : Si l'on connecte directement un panneau à une charge fixe (comme une batterie ou une résistance), le point de fonctionnement se situe à l'intersection de la courbe $I(V)$ du panneau et de la caractéristique de la charge. Perte d'efficacité : Ce point d'équilibre naturel se situe très rarement au sommet de la courbe de puissance. Sans dispositif d'extraction, le système peut fonctionner avec une perte de rendement allant de 20% à 50% par rapport

à sa capacité réelle [14].

Dynamique des Variations Environnementales : La nécessité de cette extraction est accentuée par la volatilité de l'environnement climatique. Le PPM est une cible mouvante : Variations de l'irradiation (G) : Une modification de l'éclairement déplace verticalement la courbe de puissance, changeant l'intensité du courant produit. Impact de la température (T) : Un échauffement des cellules décale le sommet de la courbe vers des tensions plus faibles. Sans un mécanisme d'ajustement en temps réel, un système optimisé pour des conditions standard (25°C , $1000\text{W}/\text{m}^2$) deviendrait inefficace face aux fluctuations météorologiques quotidiennes [15]. **Le Rôle de l'Adaptation d'Impédance :** Pour extraire cette puissance maximale, le système doit satisfaire au théorème du transfert de puissance maximale. Ce dernier stipule que le transfert d'énergie est optimal lorsque l'impédance de la charge est égale à l'impédance interne de la source. Le dispositif MPPT agit comme un transformateur d'impédance électronique. En ajustant le rapport cyclique (D) d'un convertisseur DC-DC, il modifie l'impédance apparente vue par le panneau. Cela permet de maintenir le GPV à sa tension optimale (V_{mp}) tout en fournissant à la charge la tension requise pour son fonctionnement [16], [17].

1.1.2.2 Algorithmes MPPT conventionnels

a Perturbation et Observation (P&O)

L'algorithme P&O est la méthode la plus largement adoptée en raison de sa structure de commande indépendante du modèle, ce qui signifie qu'il n'a pas besoin de connaître les paramètres internes du panneau photovoltaïque [14].

- **Analyse de la Stabilité :** Le fonctionnement repose sur une boucle de rétroaction continue. Selon des études récentes, l'efficacité du P&O est intrinsèquement liée au ratio entre le pas de perturbation (ΔV) et la période d'échantillonnage [18]. Un pas trop large permet d'atteindre la zone du MPP rapidement mais génère des pertes par oscillations massives en régime établi.
- **Le Phénomène de Divergence :** Dans des conditions d'irradiation changeant rapidement (passage nuageux), l'algorithme peut interpréter l'augmentation de la puissance due au changement climatique comme un résultat positif de sa propre perturbation, le poussant ainsi à s'éloigner du point optimal. C'est ce qu'on appelle l'erreur de poursuite dynamique [19].

b Incrément de la Conductance (IncCond)

L'IncCond est souvent considéré comme supérieur au P&O dans les systèmes de haute précision car il utilise la pente de la courbe de puissance pour localiser le MPP [16].

- **Fondement Mathématique :** L'algorithme résout l'équation de la dérivée de la puissance par rapport à la tension ($\frac{dP}{dV} = 0$). En développant cette expression ($I + V \frac{dI}{dV} = 0$), on obtient la condition d'arrêt : $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ [8].

- **Avantage de Régime Permanent** : Contrairement au P&O, l'IncCond possède une condition d'égalité stricte. Une fois que la conductance incrémentale égale l'opposé de la conductance instantanée, l'algorithme cesse de perturber le système [20]. Cela élimine les oscillations résiduelles de tension, ce qui est crucial pour maintenir un faible taux de distorsion harmonique (THD) dans l'étage de conversion suivant [21].

c Méthodes de Référence Fractionnaire (Boucle Ouverte)

Ces méthodes utilisent des caractéristiques intrinsèques aux semi-conducteurs pour estimer le MPP de manière quasi instantanée [17].

- **Tension en Circuit Ouvert Fractionnaire (V_{oc})** : Elle repose sur l'observation empirique que le ratio V_{mpp}/V_{oc} est approximativement constant (entre 0,7 et 0,8) [1]. Bien que très rapide, cette méthode impose de déconnecter périodiquement la charge pour mesurer V_{oc} , entraînant une perte de production cyclique [23].
- **Limites sous Ombrage** : Ces algorithmes échouent généralement en présence d'ombrage partiel. En effet, la relation linéaire s'effondre lorsque la courbe de puissance présente plusieurs pics locaux, car l'algorithme n'est pas conçu pour scanner l'intégralité de la plage de tension [23].

Critère de Performance	P&O	IncCond	V_{oc} Fractionnaire
Vitesse de convergence	Moyenne	Bonne	Très rapide
Complexité de calcul	Faible	Élevée [16]	Très faible
Précision (Conditions stables)	Moyenne	Excellente	Faible (Approximative)
Comportement dynamique	Risque de divergence [15]	Très robuste [20]	Limité [23]
Oscillations au MPP	Présentes [16]	Nulles (Théorique)	Nulles

TABLE 1.1 – Comparaison des performances techniques des algorithmes MPPT conventionnels.

1.1.2.3 Algorithmes MPPT intelligents

a Contrôle par Logique Floue (Fuzzy Logic Control - FLC)

La logique floue est l'une des méthodes intelligentes les plus populaires car elle ne nécessite pas de modèle mathématique exact du système photovoltaïque [16].

- **Principe technique** : Contrairement à la logique binaire, le FLC traite des variables linguistiques (ex : Petit Positif, Grand Négatif). Le processus comprend trois étapes : la fuzzification des entrées (généralement l'erreur E et sa variation ΔE), l'inférence basée sur une base de règles Si-Alors, et la défuzzification pour générer le signal de commande [21].
- **Performance** : Cette méthode offre une convergence rapide et réduit considérablement les oscillations autour du point de puissance maximale (MPP) par rapport aux méthodes conventionnelles. Elle est particulièrement robuste face aux variations non linéaires de température

et d'irradiance [25].

b Réseaux de Neurones Artificiels (ANN)

Les ANN simulent le fonctionnement du cerveau humain pour apprendre et prédire le point de puissance maximale à partir de données d'entrée environnementales [24].

- **Structure** : Un réseau type se compose d'une couche d'entrée (recevant l'irradiance G et la température T), de couches cachées pour le traitement, et d'une couche de sortie fournissant la tension optimale V_{mpp} .
- **Avantages** : Une fois la phase d'apprentissage terminée, le réseau peut suivre le MPP de manière quasi instantanée sans aucune oscillation. Cependant, sa précision est strictement dépendante de la richesse de la base de données d'entraînement et de la configuration des neurones [24].

c Optimisation par Essaim de Particules (PSO)

Le PSO est un algorithme méta-heuristique bio-inspiré, devenu la référence pour résoudre le problème de l'ombrage partiel [23].

- **Mécanisme de recherche** : Dans des conditions d'ombrage, la courbe $P - V$ présente plusieurs pics locaux. Le PSO utilise une population de particules qui explorent l'espace de recherche. Chaque particule ajuste sa position en fonction de sa meilleure expérience personnelle (P_{best}) et de la meilleure position trouvée par l'ensemble du groupe (G_{best}).
- **Efficacité** : Cette capacité de recherche globale permet à l'algorithme de sauter les pics locaux pour se fixer sur le GMPP (Global Maximum Power Point), garantissant ainsi une extraction d'énergie maximale là où les algorithmes conventionnels échoueraient [23],[26].

Algorithme	Complexité	Vitesse de réponse	Gestion de l'ombrage partiel
Logique Floue (FLC)	Moyenne	Très rapide	Limitée
Réseaux de Neurones (ANN)	Élevée	Instantanée	Dépend de l'entraînement [24]
PSO (Essaim de particules)	Moyenne	Rapide	Excellente (GMPP) [23]
GWO (Loup Gris)	Faible	Très rapide	Excellente (GMPP) [26]

TABLE 1.2 – Synthèse comparative des méthodes MPPT intelligentes.

1.1.3 Le Convertisseur Boost

Le convertisseur Boost (ou hacheur survolteur) est un dispositif d'électronique de puissance dont la fonction principale est de convertir une tension continue (V_{in}) en une tension continue de sortie plus élevée (V_{out}). Dans un système photovoltaïque, il agit comme l'interface entre les panneaux et l'onduleur, permettant d'élever la tension tout en exécutant l'algorithme MPPT [14].

- **Principe de fonctionnement** : Le fonctionnement repose sur le stockage d'énergie dans une inductance (L) et son transfert vers la charge. Il opère en deux phases distinctes définies par

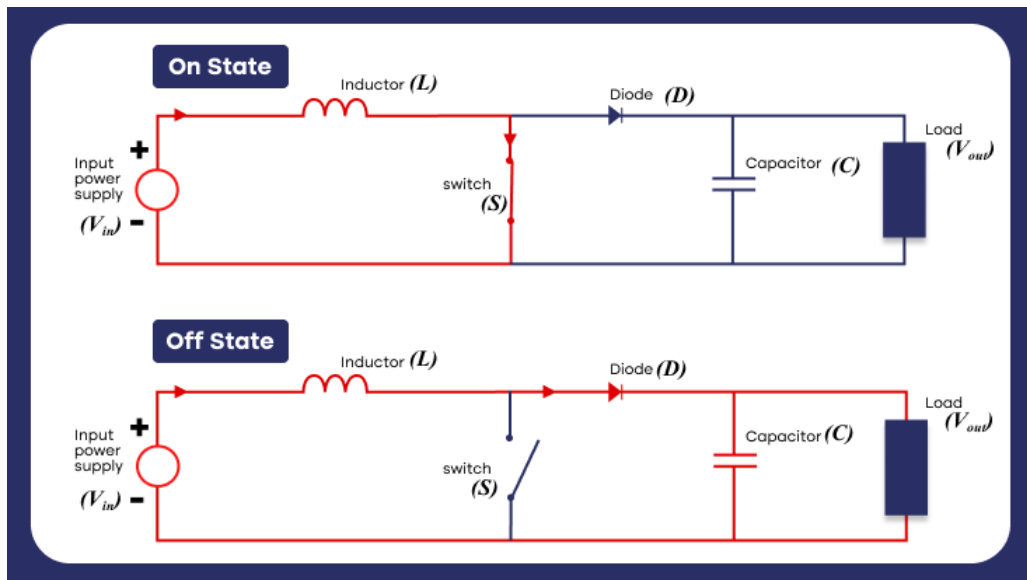


FIGURE 1.5 – Principe de fonctionnement du convertisseur Boost : (a) phase d'accumulation (interrupteur fermé), (b) phase de transfert (interrupteur ouvert) [32]

l'état de l'interrupteur statique (S), généralement un MOSFET ou un IGBT.

- **Phase d'accumulation (S fermé, durée DT)** : L'inductance est connectée directement à la source V_{in} . Le courant i_L croît linéairement, stockant de l'énergie magnétique. La diode (D) est bloquée, empêchant le condensateur (C) de se décharger dans la source. La charge est alors alimentée uniquement par l'énergie stockée dans le condensateur.
- **Phase de transfert (S ouvert, durée $(1 - D)T$)** : L'interrupteur s'ouvre. Pour s'opposer à l'annulation du courant, l'inductance inverse sa polarité. La tension à ses bornes s'ajoute à V_{in} , ce qui rend la diode passante. L'énergie stockée est transférée vers le condensateur et la charge. La tension de sortie est alors supérieure à celle d'entrée.

1.1.3.1 Stratégies de Commande

La commande du convertisseur Boost vise à ajuster le rapport cyclique D pour atteindre un objectif spécifique.

- **Commande MPPT** : Dans les applications solaires, le rapport cyclique est calculé par des algorithmes (P&O, IncCond, ou Flou) pour forcer le panneau à travailler à son point de puissance maximale. Le convertisseur agit alors comme un adaptateur d'impédance dynamique [16].
- **Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM)** : C'est la méthode la plus courante. Le signal de commande issu de l'algorithme MPPT est comparé à une onde porteuse triangulaire de haute fréquence pour générer les impulsions d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur [17].
- **Contrôle du courant** : Pour éviter la saturation de l'inductance et améliorer la réponse

transitoire, une boucle de courant interne est souvent ajoutée au-dessus de la boucle de tension [21].

1.1.4 La Qualité de l'Énergie Électrique

1.1.4.1 Définition et Perturbations

La qualité de l'énergie électrique est devenue une question centrale dans la gestion des systèmes de puissance modernes, tout particulièrement dans les cas de l'intégration massive de l'électronique de puissance, de l'informatique et des sources d'énergie renouvelables.

- **Énoncé du Concept de la Qualité du Courant** : Ainsi, c'est la qualité du courant (Power Quality), c'est-à-dire la capacité du réseau électrique à délivrer à ses clients une tension statique et une onde de courant purement sinusoïdale à fréquence constante.
- **Conformité en tension** : donnant la capacité à fournir une tension dans les limites prescrites, c'est-à-dire à l'amplitude, à la fréquence, à la forme d'onde.
- **Continuité de service** : c'est l'absence d'appauvrissements de fourniture.
- **Compatibilité Électromagnétique (CEM)** : c'est la capacité des matériels à fonctionner dans leur environnement électromagnétique sans eux-mêmes introduire des perturbations incompatibles [1].

a Les Principales Perturbations Électriques

Les perturbations peuvent être classées selon leur durée et la nature de la déformation qu'elles infligent à l'onde sinusoïdale.

- **A. Les Harmoniques** : Produits par des charges non linéaires (variateurs de vitesse, redresseurs, alimentations à découpage, onduleurs PV), les harmoniques sont des courants ou tensions dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale (50 Hz ou 60 Hz).

Conséquence : Échauffement des transformateurs, déclenchements intempestifs des disjoncteurs et résonance dans les batteries de condensateurs [8].

Indicateur : Le Taux de Distorsion Harmonique (THD) est l'indice de référence pour mesurer cette pollution.

- **B. Les Variations d'Amplitude** :

Creux de tension (Sags) : Une baisse soudaine de la tension (entre 10% et 90%) d'une durée allant de quelques millisecondes à une minute. Souvent causés par le démarrage de gros moteurs ou des défauts sur le réseau.

Surintensités transitoires (Swells) : Une augmentation de la tension au-delà de 110% de la valeur nominale. Elles résultent souvent de la déconnexion de charges importantes ou de phénomènes atmosphériques (foudre) [11].

- **C. Les Interruptions** : Elles correspondent à une perte totale de la tension d'alimentation. Elles sont classées en interruptions brèves (moins de 3 minutes) ou longues (plus de 3 minutes) [14].
- **D. Le Flicker (Papillotement)** : Il s'agit d'une fluctuation rapide et répétitive de la tension qui provoque des variations de l'éclairement des lampes, créant une gêne visuelle pour l'humain. Il est généralement causé par des charges à variation rapide comme les fours à arc [1].

b Solutions d'Amélioration de la Qualité de l'Énergie

Pour pallier les perturbations de la qualité de l'énergie (harmoniques, creux de tension, flicker) et optimiser l'efficacité des systèmes comme le convertisseur Boost et les algorithmes MPPT, plusieurs solutions techniques peuvent être mises en œuvre.

- **1. Filtrage des Harmoniques** : Le filtrage est essentiel pour réduire le Taux de Distorsion Harmonique (*THD*) et protéger les composants sensibles.
 - **Filtres Passifs** : Composés d'inductances et de condensateurs accordés sur une fréquence spécifique (souvent le rang 5 ou 7). Ils sont simples mais peu flexibles face aux variations de charge.
 - **Filtres Actifs (APF)** : Utilisent l'électronique de puissance pour injecter des courants harmoniques en opposition de phase avec ceux de la charge, annulant ainsi la pollution au point de raccordement [1].
 - **Filtres Hybrides** : Combinaison des deux pour bénéficier de la robustesse du passif et de la précision de l'actif.
- **2. Compensation de l'Énergie Réactive** : Il apparaît donc aujourd'hui nécessaire d'avoir recours à du contrôle réactif pour stabiliser la tension et rendre de la capacité de transport disponible sur le réseau. Le STATCOM (Static Synchronous Compensator) est un dispositif basé sur un onduleur, qui peut injecter ou absorber de la puissance réactive de façon quasi instantanée [11].
 - **SVC (Static Var Compensator)** : Utilise des réactances commandées par thyristors. Bien que plus lent que le STATCOM, il reste une solution fiable pour les réseaux à haute tension.
- **3. Amélioration au niveau du Convertisseur Boost** : Pour améliorer la qualité de l'énergie dès la source (le générateur PV) :
 - **Entrelacement (Interleaved Boost Converter)** : Utiliser plusieurs bras de conversion en parallèle déphasés entre eux. Cela réduit drastiquement l'ondulation du courant d'entrée et de la tension de sortie.
 - **Soft Switching (ZVS/ZCS)** : Techniques de commutation à tension ou courant nul pour

réduire les pertes par commutation et les interférences électromagnétiques (EMI) [8].

- **4. Optimisation des Commandes Intelligentes :** Le passage de commandes classiques à des commandes avancées améliore la stabilité dynamique :
 - **Commande par Mode Glissant (Sliding Mode Control) :** Très robuste face aux variations de paramètres (comme les changements brusques d'irradiation ou de charge).
 - **Contrôleurs Flous Adaptatifs :** Permettent d'ajuster dynamiquement le pas de recherche du MPPT, éliminant les oscillations en régime établi tout en garantissant une convergence rapide vers le GMPP [26].

c Le Filtre Actif Parallèle (FAP)

Le Filtre Actif Parallèle (FAP) est un convertisseur statique de puissance utilisé pour compenser dynamiquement les courants harmoniques et la puissance réactive générés par des charges non linéaires (variateurs de vitesse, redresseurs, équipements informatiques). Contrairement aux filtres passifs, le FAP ne présente pas de risques de résonance avec le réseau et peut s'adapter instantanément aux variations de la charge [29].

- **1. Principe de Fonctionnement :** Le FAP est connecté en parallèle au point de raccordement commun (PCC). Son principe repose sur l'injection de courants de compensation (i_f) en opposition de phase avec les courants perturbateurs.

Équation fondamentale : $i_s(t) = i_L(t) - i_f(t)$.

Si le filtre injecte exactement la composante harmonique et réactive de la charge, le courant de source (i_s) redevient purement sinusoïdal et en phase avec la tension [27].

- **2. Architecture du Système :** Un FAP se décompose en deux modules essentiels :
 - **Circuit de Puissance :** Constitué d'un onduleur de tension triphasé (VSI) à base d'IGBT, d'une inductance de couplage (L_f) pour le lissage du courant injecté, et d'un condensateur de stockage côté continu (C_{dc}) qui maintient la tension du bus stable [28].
 - **Circuit de Commande :** Il assure l'identification des harmoniques en temps réel. Les méthodes les plus répandues sont la théorie de la puissance instantanée ($p - q$) ou la méthode des courants synchrones ($d - q$) [27].
- **3. Avantages Stratégiques :**
 - **Polyvalence :** Capable de filtrer plusieurs rangs harmoniques simultanément (jusqu'au rang 50).
 - **Robustesse :** Indépendant de l'impédance du réseau, ce qui évite les phénomènes de résonance série ou parallèle rencontrés avec les filtres passifs [29].
 - **Multifonction :** En plus du filtrage, il peut assurer la compensation du facteur de puissance

et l'équilibrage des courants de phase [28].

Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les fondements théoriques et technologiques nécessaires à la compréhension d'une chaîne de conversion photovoltaïque connectée au réseau électrique.

Dans un premier temps, nous avons présenté le générateur photovoltaïque (GPV) en détaillant son principe de conversion basé sur l'effet photovoltaïque au sein d'une jonction PN. Les modèles électriques à une et deux diodes ont été exposés, permettant de simuler le comportement non linéaire de la cellule et du panneau. Nous avons également mis en évidence l'influence prépondérante des conditions environnementales — irradiation, température et ombrage partiel — sur les performances énergétiques du GPV.

Ensuite, nous avons justifié la nécessité d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour extraire en permanence la puissance maximale disponible, compte tenu du caractère mouvant du point de puissance maximale (PPM) sous l'effet des variations climatiques. Une comparaison détaillée entre les algorithmes conventionnels (P&O, IncCond, tension fractionnaire) et les méthodes intelligentes (logique floue, réseaux de neurones, PSO) a montré que si les premiers restent simples à implémenter, les seconds offrent une bien meilleure efficacité, notamment en présence d'ombrage partiel où seuls les algorithmes méta-heuristiques (PSO, GWO) parviennent à localiser le maximum global (GMPP).

Nous nous sommes ensuite intéressés au convertisseur Boost, qui constitue l'interface indispensable entre le panneau PV et l'onduleur. Son principe de fonctionnement en deux phases (accumulation et transfert) a été expliqué, ainsi que son rôle d'adaptateur d'impédance dynamique sous l'action de la commande MPPT via une modulation de largeur d'impulsion (PWM).

Enfin, ce chapitre a abordé la problématique cruciale de la qualité de l'énergie électrique. Nous avons défini les principales perturbations (harmoniques, creux et sursensions, interruptions, flicker) et présenté plusieurs solutions d'amélioration, parmi lesquelles le filtrage actif occupe une place privilégiée. Le filtre actif parallèle (FAP), dont le principe et l'architecture ont été décrits, permet de compenser dynamiquement les courants harmoniques et la puissance réactive, garantissant ainsi une injection sinusoïdale et conforme aux normes.

Ainsi, ce premier chapitre a fourni l'ensemble des éléments théoriques nécessaires à la modélisation et à la simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de la méthodologie adoptée, incluant la description des outils de simulation, des paramètres des composants et des protocoles de test mis en œuvre pour valider les performances des différentes commandes étudiées.

2 Modélisation et Commande du Système Photovoltaïque Raccordé au Réseau

2.1 Introduction

Ces dernières années, la dépendance énergétique s'est accrue et les ressources disponibles s'épuisent d'année en année, notamment durant l'été en raison de l'utilisation intensive de la climatisation dans les habitations et les entreprises. L'énergie solaire est l'une des solutions les plus couramment adoptées par de nombreux pays pour pallier cette pénurie. Toutefois, le raccordement des systèmes d'énergie solaire au réseau électrique conventionnel pose des défis scientifiques et techniques qui exigent des solutions efficaces, compte tenu des fluctuations de l'ensoleillement et de la nécessité de synchroniser la production d'énergie avec le réseau.

L'objectif de cet axe est de construire un système mathématique intégré et une stratégie solide et efficace pour la chaîne de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique prête à l'emploi basée sur l'environnement MATLAB/Simulink constituée d'un ensemble de cinq éléments majeurs qui sont : le générateur photovoltaïque (GPV), le convertisseur DC-DC (Boost), l'étage MPPT, l'inverseur triphasé et le filtre LC de couplage.

La modélisation du GPV obéit à un modèle à une diode qui offre un compromis acceptable entre précision et complexité. Le hacheur Boost est représenté par son modèle moyenné dans l'espace d'état. Trois algorithmes MPPT sont étudiés et comparés : Perturbation & Observation (P&O), Logique Floue (FLC) et Réseaux de Neurones Artificiels (ANN). L'onduleur triphasé est commandé par une technique d'hystérésis tandis qu'une PLL assure la synchronisation avec le réseau.

Le chapitre est structuré comme suit : Section 2.1 présente la modélisation du GPV ; Section 2.2 détaille le modèle du hacheur Boost ; Section 2.3 décrit les stratégies MPPT ; Section 2.4 aborde l'onduleur et sa commande ; Section 2.5 finalise avec le filtre LC et le modèle du réseau. Enfin, une conclusion récapitule les équations clés et prépare l'implémentation sous Simulink.

2.2 Modélisation Électrique du Générateur Photovoltaïque (GPV)

2.2.1 Choix du Modèle à une Diode : Compromis entre Précision et Temps de Calcul

Le générateur photovoltaïque (GPV) convertit l'énergie solaire en énergie électrique par l'effet photovoltaïque. Lorsque les photons issus du rayonnement solaire frappent la jonction semi-conductrice, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la bande de valence, créant ainsi des paires électron-trou. Ces charges sont séparées par le champ électrique interne de la jonction P-N, générant un courant électrique proportionnel à l'éclairement [1].

Pour modéliser ce comportement, on utilise un circuit électrique équivalent composé d'une source de courant I_{ph} (proportionnelle à l'irradiation), d'une diode représentant la jonction P-N, d'une résistance série R_s (pertes dans le semi-conducteur et les contacts) et d'une résistance shunt R_{sh}

(courants de fuite) [2].

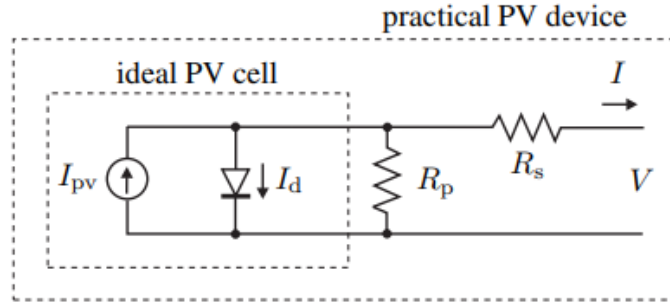


Fig. 1. Single-diode model of the theoretical photovoltaic cell and equivalent circuit of a practical photovoltaic device including the series and parallel resistances.[8]

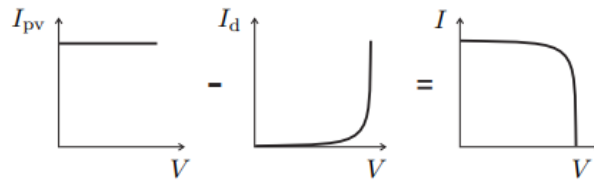


Fig. 2. Characteristic I-V curve of the photovoltaic cell. The net cell current I is composed of the light-generated current I_{pv} and the diode current I_d . [8]

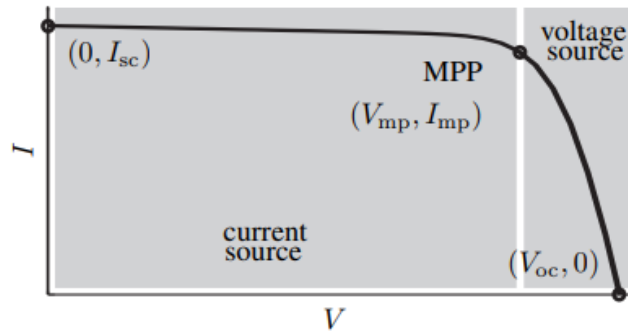


Fig. 3. Characteristic I-V curve of a practical photovoltaic device and the three remarkable points : short circuit \$(0, I_{sc})\$, maximum power point \$(V_{mp}, I_{mp})\$ and open-circuit \$(V_{oc}, 0)\$. [8]

L'équation caractéristique du modèle à une diode est donnée par [1] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Où :

- I_{pv} : Courant de sortie du panneau (A)
- V_{pv} : Tension aux bornes du panneau (V)

- I_{ph} : Courant photo-généré (A)
- I_0 : Courant de saturation inverse de la diode (A)
- $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C : Charge élémentaire
- $k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K : Constante de Boltzmann
- T : Température de la jonction (K)
- a : Facteur d'idéalité de la diode ($1 \leq a \leq 1.5$)
- R_s : Résistance série (Ω)
- R_{sh} : Résistance shunt (Ω)

La relation entre courant photo-généré I_{ph} et l'irradiation G est donnée par [3] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{sc,ref} + K_i(T - T_{ref})) \quad (2.2)$$

Où $G_{ref} = 1000$ W/m², $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, $I_{sc,ref}$ est le courant de court-circuit aux conditions STC, et K_i est le coefficient de température du courant [4].

Symbole	Désignation	Valeur
P_{max}	Puissance maximale	200 W
V_{mp}	Tension au point MPP	26.3 V
I_{mp}	Courant au point MPP	7.61 A
V_{oc}	Tension en circuit ouvert	32.9 V
I_{sc}	Courant de court-circuit	8.21 A
N_s	Nombre de cellules en série	54
K_v	Coefficient de température de V_{oc}	-0.123 V/K
K_i	Coefficient de température de I_{sc}	0.00318 A/K

TABLE 2.1 – Résumé des équations fondamentales du modèle à une diode

Hypothèses Simplificatrices

Pour simplifier le modèle, les hypothèses suivantes sont adoptées [1][3] :

1. L'irradiation G est supposée uniforme sur toute la surface du panneau (pas d'ombrage partiel) [6].
2. La température T est considérée uniforme dans la jonction [4].
3. Les paramètres R_s et R_{sh} sont supposés constants dans les conditions normales de fonctionnement [2].
4. Le modèle à une diode néglige les effets de recombinaison dans la zone de charge d'espace (contrairement au modèle à deux diodes) [7].
5. L'effet de l'encrassement sur le panneau est négligé dans cette étude [8].

Les paramètres du panneau présentés dans le Tableau I sont extraits de la fiche technique du module Kyocera KC200GT [5].

Les paramètres caractéristiques du modèle (I_{ph} , I_0 , a , R_s , R_{sh}) sont généralement extraits des données fournies par le fabricant, en résolvant le système d'équations non linéaires aux points particuliers : court-circuit ($V_{pv} = 0$, $I_{pv} = I_{sc}$), circuit ouvert ($I_{pv} = 0$, $V_{pv} = V_{oc}$) et point de puissance maximale ($V_{pv} = V_{mp}$, $I_{pv} = I_{mp}$) [1][2].

2.2.2 Équations Fondamentales du Circuit Équivalent : $I_{pv} = f(V_{pv}, G, T)$

Les équations fondamentales du circuit équivalent décrivent la relation mathématique entre le courant de sortie I_{pv} et la tension V_{pv} aux bornes du panneau photovoltaïque. Ces équations sont essentielles pour comprendre le comportement électrique du GPV et pour simuler ses performances sous différentes conditions [1][8].

La figure ?? présente la forme typique de la courbe $I-V$. On distingue trois points particulièrement importants qui permettent de caractériser entièrement le panneau :

- Le point de court-circuit ($0, I_{sc}$) où la tension est nulle.
- Le point de circuit ouvert ($V_{oc}, 0$) où le courant est nul.
- Le point de puissance maximale MPP (V_{mp}, I_{mp}) où le produit $P = V \times I$ est maximal.

L'équation maîtresse du modèle à une diode, reliant le courant de sortie I_{pv} à la tension V_{pv} , est donnée par [8][6] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Cette équation est implicite car le courant I_{pv} apparaît des deux côtés de l'égalité. Sa résolution nécessite des méthodes numériques comme la méthode de Newton-Raphson [3][4].

Équations aux points particuliers

Aux trois points caractéristiques, l'équation se simplifie [1] :

1. **Au point de court-circuit** ($V_{pv} = 0$, $I_{pv} = I_{sc}$) :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qI_{sc}R_s}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

2. **Au point de circuit ouvert** ($I_{pv} = 0$, $V_{pv} = V_{oc}$) :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

3. **Au point de puissance maximale** ($V_{pv} = V_{mp}$, $I_{pv} = I_{mp}$) :

$$I_{mp} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

De plus, à ce même point MPP, la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle :

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{MPP} = \left. \frac{d(I_{pv}V_{pv})}{dV} \right|_{MPP} = I_{mp} + V_{mp} \left. \frac{dI_{pv}}{dV} \right|_{MPP} = 0 \quad (2.7)$$

Condition	Équation	Inconnues
Courant général	$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}}$	5 paramètres
Court-circuit ($V = 0$)	$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qI_{sc}R_s}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}}$	Relation entre I_{ph} , I_0 , R_s , R_{sh}
Circuit ouvert ($I = 0$)	$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$	Relation entre I_{ph} , I_0 , R_{sh}
Point MPP	$I_{mp} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}}$	Vérification de la solution

TABLE 2.2 – Résumé des équations fondamentales du modèle à une diode

—

““latex

Hypothèses Simplificatrices pour les Équations

Pour établir ces équations fondamentales, les hypothèses suivantes sont généralement adoptées [8][1][11] :

1. La jonction P-N est considérée comme une diode idéale, modélisée par l'équation de Shockley.
2. Le courant photo-généré I_{ph} est directement proportionnel à l'irradiation G et indépendant de la tension aux bornes de la cellule.
3. La résistance série R_s est supposée constante (indépendante du courant et de la tension).
4. La résistance shunt R_{sh} est également supposée constante dans la plage de fonctionnement normale.
5. Les effets de l'ombrage partiel ne sont pas pris en compte dans cette modélisation de base [10].
6. La température T est considérée uniforme dans toute la cellule [11].

2.2.3 Prise en Compte des Variations Climatiques : Effets de l'Irradiation et de la Température

Les performances d'un panneau photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, principalement l'irradiation solaire G (W/m^2) et la température de la cellule T ($^{\circ}\text{C}$ ou K) [11][13].

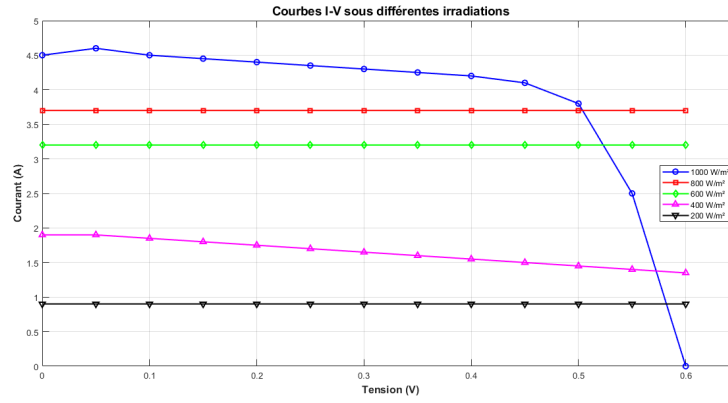


FIGURE 2.1 – Effets de l’irradiation et de la température sur les courbes caractéristiques d’un panneau photovoltaïque : (a) Influence de l’irradiation G , (b) Influence de la température T [8][11].

Effet de l’irradiation G

Le courant photo-généré I_{ph} est proportionnel à l’irradiation G [8][1] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{sc,ref} + K_i(T - T_{ref})) \quad (2.8)$$

Effet de la température T

La température influence principalement la tension de circuit ouvert V_{oc} [11][4] :

$$V_{oc}(T) = V_{oc,ref} + K_v(T - T_{ref}) \quad (2.9)$$

$$I_0(T) = I_{0,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (2.10)$$

Paramètre	Symbole	Valeur
Coefficient de température de I_{sc}	K_i	0.00318 A/K
Coefficient de température de V_{oc}	K_v	-0.123 V/K
Coefficient de température de P_{max}	γ	-0.80 W/K

TABLE 2.3 – Coefficients de température pour le module Kyocera KC200GT [5]

Hypothèses

Les hypothèses suivantes sont généralement adoptées [8][11][13] :

1. L’irradiation G est uniforme sur toute la surface du panneau.
2. La température T est uniforme dans toute la cellule.
3. Les coefficients de température sont constants dans la plage -10°C à 75°C .
4. Les effets de l’encrassement et du vieillissement sont négligés.

2.3 Modélisation Dynamique du Convertisseur DC-DC (Hacheur Boost)

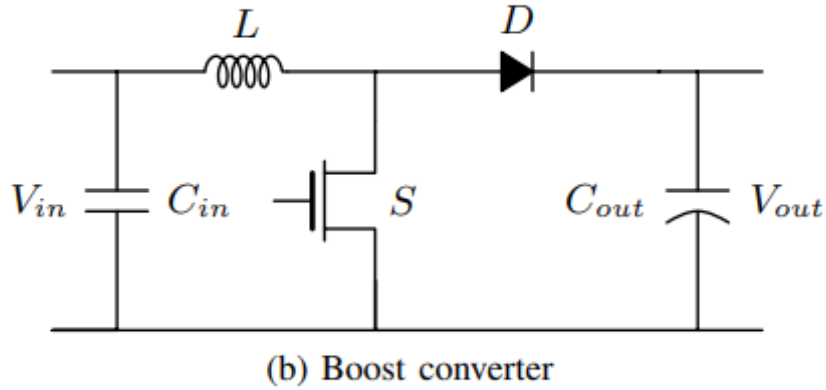


FIGURE 2.2 – Schéma de principe du convertisseur DC-DC Boost (hacheur série) [31].

Principe de fonctionnement

Le convertisseur DC-DC Boost (ou hacheur série) est placé entre le GPV et l'onduleur. Il élève la tension continue de sortie du GPV à un niveau adapté à l'onduleur [18][27].

Le fonctionnement repose sur deux phases :

1. Interrupteur fermé : L se charge, C se décharge dans la charge.
2. Interrupteur ouvert : L se décharge vers C et la charge.

Modèle mathématique

La relation entre tension de sortie et tension d'entrée est [18] :

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (2.11)$$

Le modèle moyen dans l'espace d'état [18][27] :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}V_{in} - \frac{1}{L}(1 - D)V_{out} \\ \frac{dV_{out}}{dt} = \frac{1}{C}(1 - D)i_L - \frac{1}{RC}V_{out} \end{cases} \quad (2.12)$$

Dimensionnement

Hypothèses

1. Composants idéaux.
2. Fréquence de découpage élevée.
3. Mode de conduction continue (MCC).
4. Ondulations faibles.

Paramètre	Symbole	Valeur
Tension d'entrée	V_{in}	26.3 V
Tension de sortie	V_{out}	400 V
Fréquence de découpage	f_s	10 kHz
Rapport cyclique	D	0.934
Inductance	L	5 mH
Capacité	C	1000 μ F

TABLE 2.4 – Paramètres du convertisseur Boost

2.4 Stratégies Avancées de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT)

2.4.1 Algorithme Classique Perturbation et Observation (P&O) : Principe et Limites

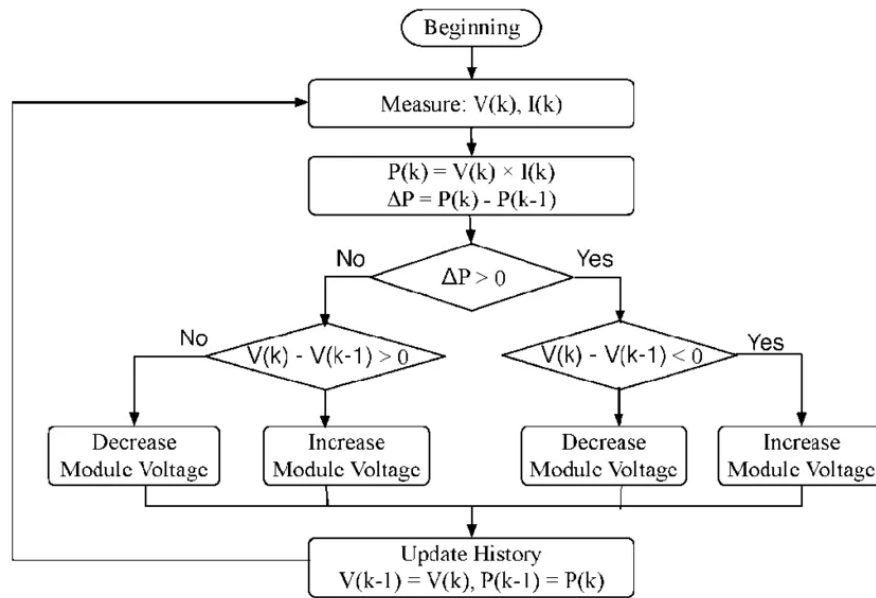


FIGURE 2.3 – Organigramme de l'algorithme de poursuite MPPT par Perturbation et Observation (P&O) [14].

L'algorithme P&O est la technique MPPT la plus répandue en raison de sa simplicité et son efficacité [14][16]. Le principe consiste à perturber périodiquement la tension de fonctionnement et à observer l'évolution de la puissance [15][21].

Algorithme

1. Mesurer $V(k)$ et $I(k)$
2. Calculer $P(k) = V(k) \times I(k)$
3. Calculer $\Delta P = P(k) - P(k-1)$ et $\Delta V = V(k) - V(k-1)$
4. Si $\Delta P > 0$:
 - Si $\Delta V > 0$: augmenter D
 - Sinon : diminuer D
5. Sinon ($\Delta P < 0$) :

- Si $\Delta V > 0$: diminuer D
- Sinon : augmenter D

6. Mettre à jour $P(k - 1)$ et $V(k - 1)$

Avantages

- Simplicité de mise en œuvre [14]
- Faible coût calculatoire [16]
- Efficacité de 95-98% en régime permanent [17]

Limites

- Oscillations autour du MPP [15]
- Compromis entre vitesse de convergence et amplitude des oscillations [19]
- Mauvaise réponse aux variations rapides d'ensoleillement [20][23]
- Convergence vers un maximum local sous ombrage partiel [25][26]

Complexité	Faible
Efficacité	95-98%
Oscillations	Présentes
Ombrage partiel	Non adapté

TABLE 2.5 – Caractéristiques de l'algorithme P&O

Ces limitations ont motivé le développement de techniques plus avancées, telles que la logique floue et les réseaux de neurones [16][24].

2.4.2 Commande par Logique Floue (FLC) : Fuzzification, Base de Règles et Défuzzification

2.4.3 Commande par Logique Floue (FLC)

La logique floue (FLC) est une technique de contrôle intelligent qui imite le raisonnement humain. Elle permet de manipuler des concepts approximatifs comme "un peu" ou "beaucoup" [16][24].

Composants du contrôleur flou

1. **Fuzzification** : Transformation des entrées (E , ΔE) en variables linguistiques [24].
2. **Base de règles** : Ensemble de règles "Si-Alors" définissant la stratégie [17].
3. **Inférence** : Application des règles (opérateur max-min) [24].
4. **Défuzzification** : Conversion de la sortie floue en ΔD (centre de gravité) [16].

Avantages

- Réponse rapide aux variations d'ensoleillement [16]
- Oscillations réduites autour du MPP [17]
- Robuste aux bruits de mesure [24]

Limites

- Nécessite une expertise pour la conception [24]
- Temps de calcul plus élevé que P&O [16]
- Règles établies par essais-erreurs [17]

	P&O	FLC
Complexité	Faible	Élevée
Oscillations	Élevées	Faibles
Temps de réponse	Lent	Rapide

TABLE 2.6 – Comparaison P&O vs FLC [16][24]

6. Programmation du FLC sous MATLAB

Pour implémenter le contrôleur flou dans MATLAB, on utilise les paramètres numériques suivants :

Ensemble flou	Code	Signification
NB	1	Négatif Grand
NM	2	Négatif Moyen
NS	3	Négatif Petit
ZE	4	Zéro
PS	5	Positif Petit
PM	6	Positif Moyen
PB	7	Positif Grand

TABLE 2.7 – Correspondance entre ensembles flous et codes numériques pour la programmation

Format des règles pour MATLAB

Chaque règle est représentée par 5 nombres :

- $[E, \Delta E, \Delta D, \text{poids}, \text{opérateur}]$
- Poids = 1 (généralement)
- Opérateur = 1 (ET / AND)

Exemple de règle

La règle "Si E est NB ET ΔE est NB ALORS ΔD est ZE" s'écrit :

$$[1, 1, 4, 1, 1]$$

2.4.4 Approche par Réseaux de Neurones Artificiels (ANN) : Architecture Multicouche et Apprentissage Hors Ligne

2.5 Onduleur Triphasé et Commande

L'onduleur triphasé transforme la tension continue V_{dc} (issue du bus DC) en tension alternative triphasée synchronisée avec le réseau [27].

E	ΔE						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB	NM	NS
NM	ZE	ZE	NM	NM	NM	NS	ZE
NS	NS	NS	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NS	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS
PS	PS	PS	ZE	PS	PS	PS	PS
PM	ZE	PS	PM	PM	PM	PM	ZE
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	ZE

TABLE 2.8 – Matrice des règles du contrôleur flou pour MPPT

2.5.1 Pont à IGBT et Commutations

Le pont est constitué de six IGBT (trois bras) [27]. Pour un bras, la tension de sortie est :

$$V_{a0} = (2S_1 - 1) \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.13)$$

avec $S_1 = 1$ (interrupteur supérieur fermé) ou 0 (ouvert) [27].

S_{sup}	S_{inf}	V_{a0}
1	0	$+V_{dc}/2$
0	1	$-V_{dc}/2$

TABLE 2.9 – États d'un bras d'onduleur [27]

2.5.2 Commande par Hystérésis (Hysteresis Band PWM)

Principe : maintenir chaque courant dans une bande $[i_a^{ref} - HB, i_a^{ref} + HB]$ [29].

Règle de commutation pour la phase a [29] :

$$\begin{cases} i_a \geq i_a^{ref} + HB \Rightarrow S_1 = 0, S_4 = 1 \\ i_a \leq i_a^{ref} - HB \Rightarrow S_1 = 1, S_4 = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Bande HB	0.01 à 0.1 A
Fréquence de commutation	Variable
Temps de réponse	$< 50\mu s$

TABLE 2.10 – Caractéristiques de la commande par hystérésis [29]

Avantages : Simplicité, rapidité, robustesse [29].

Inconvénients : Fréquence variable, spectre harmonique étendu [29].

2.5.3 Synchronisation par PLL

La PLL (Phase Locked Loop) extrait l'angle θ et la pulsation ω du réseau [27].

La transformation de Park s'écrit [27] :

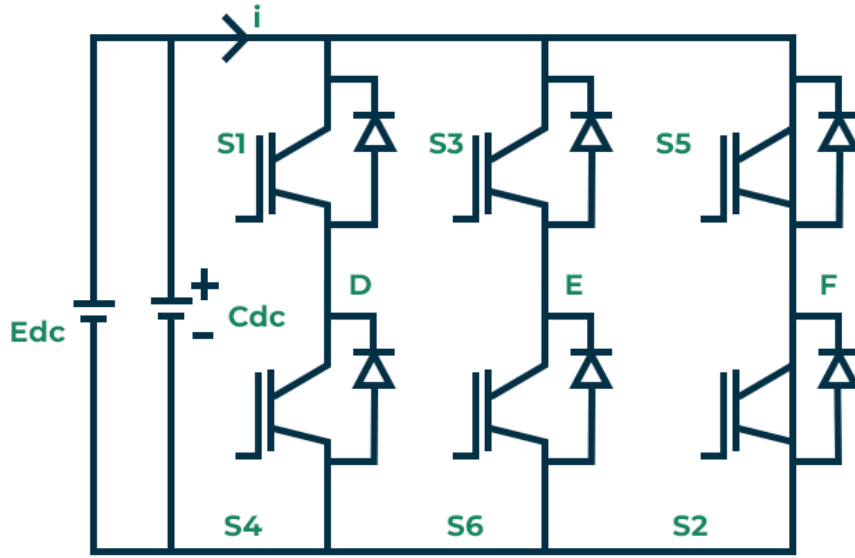


FIGURE 2.4 – Schéma d'un onduleur triphasé à IGBT [31].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

La boucle de la PLL est régie par [27] :

$$\hat{\omega} = K_p V_q + K_i \int V_q dt \quad , \quad \hat{\theta} = \int \hat{\omega} dt \quad (2.16)$$

K_p	50-100
K_i	1000-5000
Temps de réponse	20-50 ms

TABLE 2.11 – Paramètres typiques de la PLL [27]

Résumé

- **Pont IGBT** : $V_{a0} = (2S - 1)V_{dc}/2$ [27]
- **Hystérésis** : Maintien du courant dans une bande $2HB$ [29]
- **PLL** : Extraction de θ et ω par asservissement de $V_q = 0$ [27]

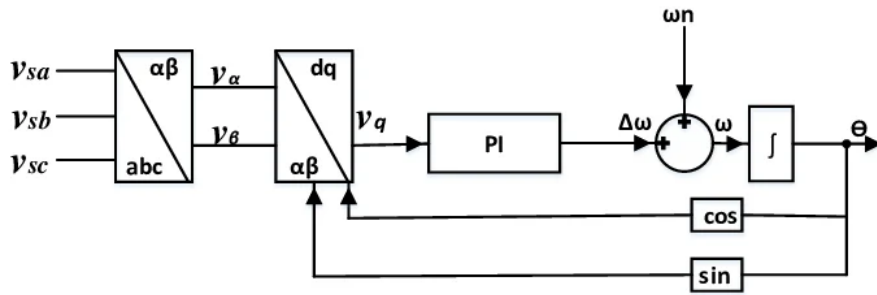


FIGURE 2.5 – Structure d'une SRF-PLL [27].

2.6 Filtre, Micro-Réseau et Réseau

Le filtre LC est placé entre l'onduleur et le réseau pour atténuer les harmoniques de commutation générées par le PWM [27]. Le micro-réseau (microgrid) peut contenir des charges triphasées connectées séquentiellement [30]. Le réseau électrique est modélisé par une source de tension idéale (infinite bus) [27].

2.6.1 Filtre LC : Dimensionnement et Rôle

Rôle du filtre LC

Le filtre LC a pour fonction d'atténuer les harmoniques de haute fréquence (autour de la fréquence de commutation $f_s = 10$ kHz) pour ne laisser passer que la composante fondamentale à 50 Hz [27].

Dimensionnement de l'inductance L_f

L'inductance L_f est dimensionnée pour limiter l'ondulation du courant Δi_{max} [27] :

$$L_f = \frac{V_{dc}}{12 \cdot f_s \cdot \Delta i_{max}} \quad (2.17)$$

avec Δi_{max} généralement compris entre 10% et 20% du courant nominal [27].

Dimensionnement de la capacité C_f

La capacité C_f est dimensionnée pour limiter la chute de tension et fixer la fréquence de résonance f_{res} [27] :

$$C_f = \frac{1}{L_f \cdot (2\pi f_{res})^2} \quad (2.18)$$

La fréquence de résonance est généralement choisie entre 10 et 50 fois la fréquence du réseau (500 Hz à 2500 Hz) [27].

Paramètre	Symbole	Valeur
Inductance	L_f	5 mH
Capacité	C_f	10 μ F
Fréquence de résonance	f_{res}	712 Hz

TABLE 2.12 – Paramètres typiques du filtre LC [27]

Fonction de transfert

La fonction de transfert du filtre LC est donnée par [27] :

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{1 + L_f C_f s^2} \quad (2.19)$$

2.6.2 Charges Triphasées Intermittentes

Description des charges

Le micro-réseau (microgrid) contient trois charges triphasées connectées à des instants différents pour tester la robustesse du système [30] :

- **Charge 1** : Connectée à $t = 0$ s (démarrage)
- **Charge 2** : Connectée à $t = t_1$ s (par exemple $t_1 = 0.5$ s)
- **Charge 3** : Connectée à $t = t_2$ s (par exemple $t_2 = 1.0$ s)

Modélisation des charges

Chaque charge est modélisée par une impédance équivalente [30] :

$$Z_{charge} = R + jX = R + jL\omega \quad (2.20)$$

Charge	Puissance (kW)	Résistance R (Ω)	Temps de connexion (s)
1	5	10	0
2	3	16	0.5
3	2	24	1.0

TABLE 2.13 – Paramètres des charges triphasées [30]

Séquence de connexion

La connexion séquentielle des charges permet d'observer [30] :

- La réponse du système face aux variations brusques de charge.
- La stabilité de la tension du bus DC.
- La qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

2.6.3 Réseau Électrique : Source Idéale (Infinite Bus)

Définition

Le réseau électrique est modélisé par une source de tension alternative idéale (infinite bus), caractérisée par une tension et une fréquence constantes, indépendantes de la puissance échangée [27].

Caractéristiques de la source idéale

Équations du réseau

Les tensions du réseau idéal sont données par [27] :

Paramètre	Valeur
Tension efficace ligne-ligne	220 V
Fréquence	50 Hz
Impédance interne	Négligée
Capacité de puissance	Illimitée

TABLE 2.14 – Caractéristiques du réseau idéal (Infinite Bus) [27]

$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \cos(\omega t) \\ V_b(t) = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c(t) = V_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.21)$$

avec $V_m = V_{rms} \sqrt{2} = 220 \times \sqrt{2} \approx 311 \text{ V}$ [27].

Limites du modèle

L'hypothèse de la source idéale est valable pour un réseau de forte puissance. Cependant, pour des études de stabilité ou de qualité d'énergie, une modélisation plus fine (incluant l'impédance de ligne) est nécessaire [27].

Résumé

- **Filtre LC** : $L_f = \frac{V_{dc}}{12f_s \Delta i_{max}}$, $C_f = \frac{1}{L_f (2\pi f_{res})^2}$ [27]
- **Charges** : 3 charges triphasées connectées à $t = 0$, $t = 0.5 \text{ s}$ et $t = 1.0 \text{ s}$ [30]
- **Réseau** : Source idéale ($V = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$) à impédance négligée [27]

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a regardé comment représenter mathématiquement un système d'énergie solaire qui est connecté au réseau électrique. On a commencé par le panneau solaire lui-même, en utilisant un modèle simple à une diode, ce qui permet d'avoir une bonne précision sans que les calculs prennent trop de temps. Après, on a modélisé le convertisseur Boost. Son travail est d'adapter l'impédance et de s'assurer qu'on tire toujours le maximum de puissance possible. On a aussi détaillé et comparé trois méthodes pour trouver ce point de puissance maximale (MPPT) : la technique classique P&O, la commande par logique floue (FLC), et celle qui se base sur des réseaux de neurones (ANN). Ensuite, on a modélisé l'onduleur triphasé, y compris sa commande par hystérésis et sa façon de se synchroniser grâce à la PLL. Pour finir, on a dimensionné le filtre LC en sortie, ainsi que le micro-réseau et ce qu'on appelle son équivalent réseau. Tous ces modèles réunis forment une base solide pour la mise en œuvre numérique qu'on fera avec MATLAB/Simulink, et c'est ce qu'on abordera dans le prochain chapitre.

3 Résultats et discussion

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons en détail les résultats obtenus par simulation sous MATLAB/Simulink. L'objectif principal est d'évaluer quantitativement et qualitativement les performances des deux techniques proposées pour l'amélioration du rendement énergétique et de la qualité de l'énergie injectée au réseau électrique.

La première partie de ce chapitre est dédiée à l'optimisation de l'extraction de la puissance maximale (MPPT). Nous comparons l'algorithme conventionnel Perturbation & Observation (P&O) à une approche avancée basée sur la logique floue. La seconde partie traite de l'amélioration de la qualité de l'énergie, en comparant un onduleur classique à deux niveaux avec un onduleur multinationaux à trois niveaux de type NPC (Neutral Point Clamped). Une attention particulière est portée à l'analyse du taux de distorsion harmonique (THD) avant et après filtrage, ainsi qu'à la conformité des résultats avec les normes internationales en vigueur (IEEE 519, EN 50160). Enfin, une discussion approfondie permet d'interpréter physiquement les résultats obtenus et de dégager les perspectives d'amélioration.

3.1 Description du système de simulation

Afin de garantir la reproductibilité et la crédibilité des résultats, cette section détaille l'environnement de simulation ainsi que les paramètres clés du modèle.

3.1.1 Paramètres de simulation

Le système photovoltaïque couplé au réseau a été modélisé sous Simulink. La charge utilisée pour les tests est de type résistive-inductive (RL), représentative des charges réelles d'un réseau domestique. Le filtre passe-bas de type LC a été dimensionné pour atténuer les harmoniques de commutation autour de la fréquence de $f_s = 10$ kHz. Les paramètres sont résumés dans le tableau 3.1.

Paramètre	Valeur
Tension DC (V_{dc})	600 V
Fréquence de commutation (f_s)	10 kHz
Fréquence de sortie (f)	50 Hz
Charge résistive (R)	10 Ω
Inductance du filtre (L)	5 mH
Capacité du filtre (C)	100 μ F
Fréquence d'échantillonnage	100 kHz

TABLE 3.1 – Paramètres généraux de simulation

3.1.2 Modèle Simulink du système

La figure 3.1 présente l'architecture complète du modèle Simulink. Celui-ci est composé de trois blocs principaux : (i) le générateur photovoltaïque modélisé par son modèle à une diode, (ii) le convertisseur DC-DC boost intégrant le bloc MPPT, et (iii) l'onduleur triphasé commandé par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et connecté au filtre LC puis à la charge.

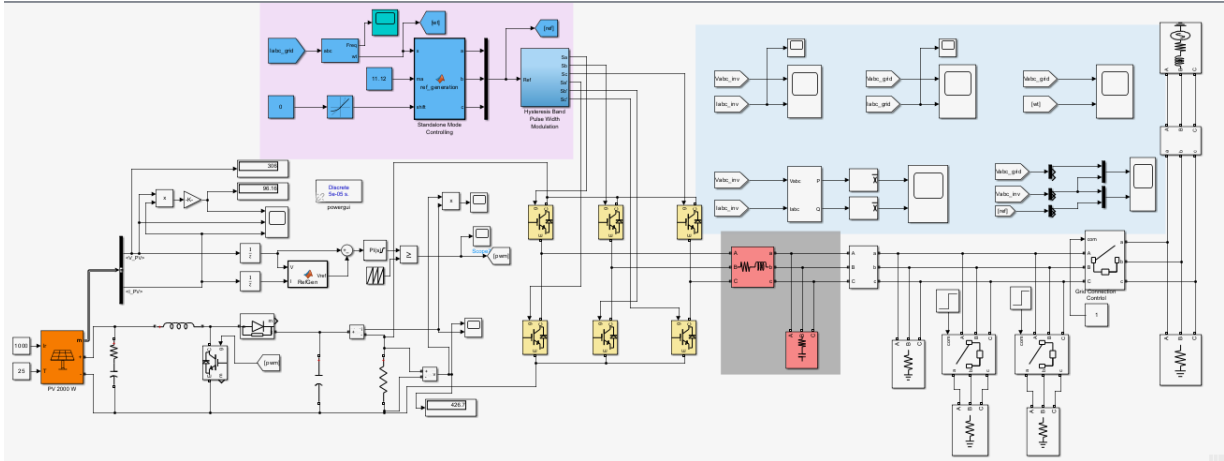


FIGURE 3.1 – Schéma général du modèle Simulink du système photovoltaïque

3.2 Optimisation du MPPT : Comparaison P&O vs Logique Floue

Le MPPT est crucial pour maximiser le rendement d'une installation photovoltaïque. Nous comparons ici l'algorithme conventionnel P&O, qui souffre d'oscillations autour du point de puissance maximale (MPP), avec l'algorithme à logique floue, connu pour sa robustesse face aux non-linéarités.

3.2.1 Résultats de l'algorithme P&O

L'algorithme P&O a été implémenté avec un pas de perturbation fixe. La figure 3.2 montre l'évolution temporelle de la puissance, de la tension et du courant délivrés par le panneau. On observe clairement un régime transitoire suivi d'un régime permanent où la puissance oscille autour de la valeur maximale. Ces oscillations sont inhérentes au principe même de l'algorithme (perturber puis observer). Les grandeurs caractéristiques sont reportées dans le tableau 3.2. Notamment, l'efficacité de seulement 88.39 % s'explique par les pertes par oscillation autour du MPP.

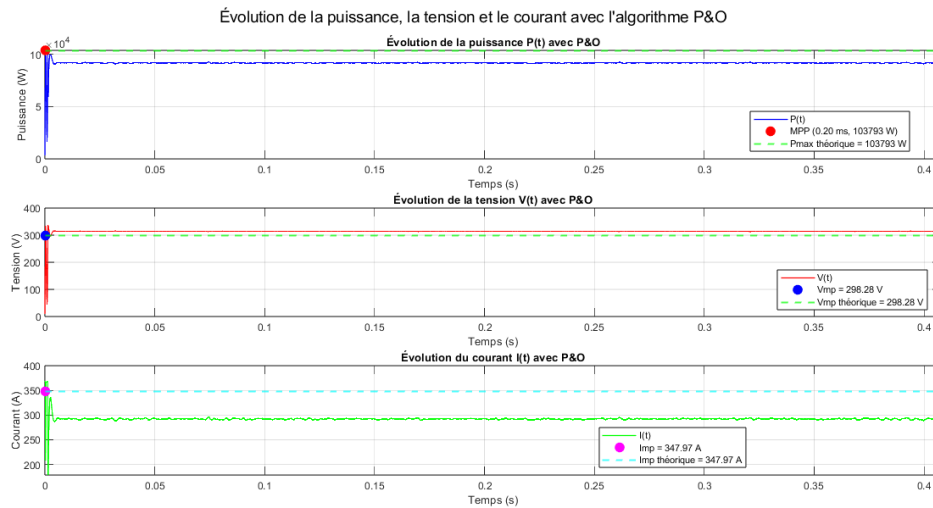


FIGURE 3.2 – Évolution de la puissance, la tension et le courant (P&O)

Paramètre	Valeur
Puissance maximale (P_{max})	103 793.29 W
Tension au MPP (V_{mp})	298.28 V
Courant au MPP (I_{mp})	347.97 A
Temps de convergence	0.20 ms
Oscillations (amplitude crête-crête)	± 1049.74 W
Efficacité statique	88.39 %

TABLE 3.2 – Résultats de l'algorithme MPPT P&O

3.2.2 Résultats de l'algorithme à Logique Floue

L'algorithme flou utilise deux entrées : l'erreur (variation de puissance sur variation de tension) et la variation de l'erreur. La figure 3.3 montre une nette amélioration. Le régime permanent est extrêmement stable, sans oscillations visibles. Le tableau 3.3 confirme ces observations avec une amplitude d'oscillation nulle (0.00 W) et une efficacité remarquable de 99.88 %. Le léger décalage de la puissance maximale par rapport à P&O (103 672.92 W contre 103 793.29 W) est dû à l'approximation du système par les règles floues, mais la stabilité obtenue compense très largement cette infime différence.

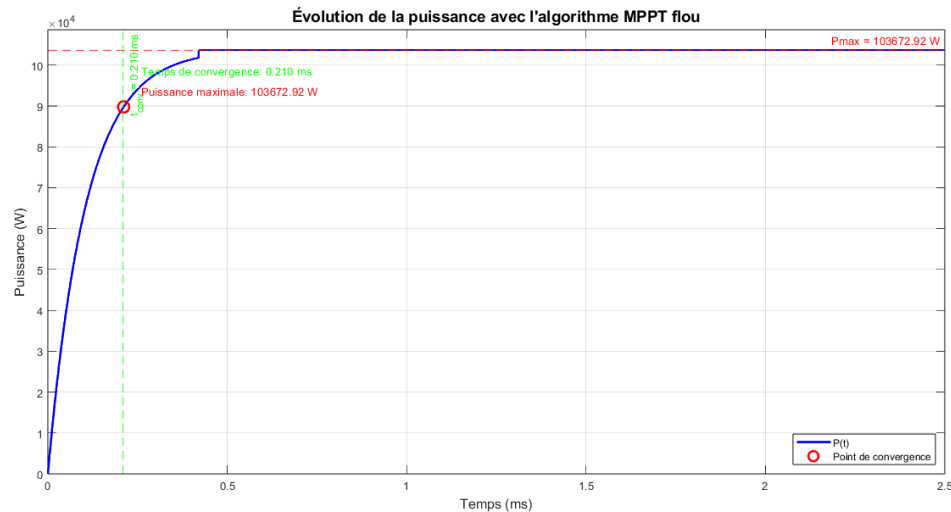


FIGURE 3.3 – Évolution de la puissance avec l’algorithme MPPT flou

Paramètre	Valeur
Puissance maximale (P_{max})	103 672.92 W
Tension au MPP (V_{mp})	296.50 V
Courant au MPP (I_{mp})	349.60 A
Temps de convergence	0.21 ms
Oscillations (amplitude)	0.00 W
Efficacité statique	99.88 %

TABLE 3.3 – Résultats de l’algorithme MPPT flou

3.2.3 Analyse comparative des algorithmes MPPT

Le tableau 3.4 synthétise les performances des deux algorithmes. La supériorité de la logique floue est flagrante en termes de stabilité (absence d’oscillations) et d’efficacité, au prix d’un temps de convergence identique et d’une puissance maximale très légèrement inférieure (0,12% de moins). Cet écart est négligeable face au gain de stabilité, qui permet un fonctionnement mais moins de stress sur les composants du convertisseur.

Paramètre	P&O	Logique Floue
Puissance maximale (W)	103 793.29	103 672.92
Temps de convergence (ms)	0.20	0.21
Oscillations (W)	± 1049.74	0.00
Efficacité (%)	88.39	99.88

TABLE 3.4 – Comparaison P&O vs Logique Floue

3.3 Amélioration de la qualité de l'énergie par onduleur multiniveaux

La qualité de l'énergie injectée est évaluée par le Taux de Distorsion Harmonique (THD) du courant de sortie. Un THD faible est synonyme d'une sinusoïde parfaite et donc d'une meilleure compatibilité électromagnétique. Nous comparons un onduleur deux niveaux (2N) conventionnel à un onduleur trois niveaux NPC (3N).

3.3.1 Description des onduleurs étudiés

- **Onduleur deux niveaux (2N) :** Structure classique à six interrupteurs (IGBT). La tension de sortie varie entre $+V_{dc}$ et $-V_{dc}$, générant ainsi des harmoniques importantes autour de la fréquence de commutation.

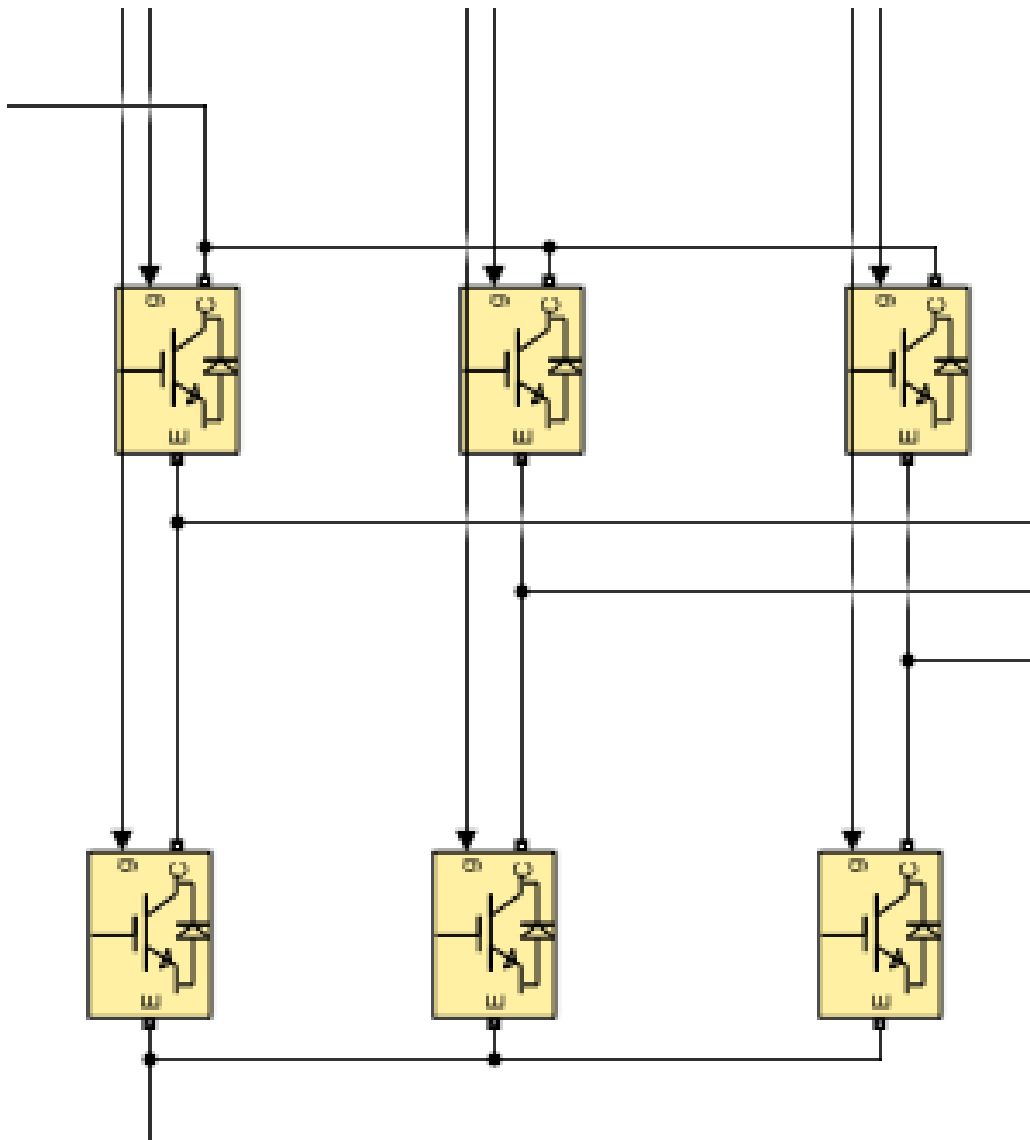


FIGURE 3.4 – Schéma Simulink de l'onduleur deux niveaux

- **Onduleur trois niveaux NPC (3N) :** Structure à douze interrupteurs et deux condensateurs de filtrage. La tension de sortie peut prendre trois niveaux : $+V_{dc}/2$, 0 et $-V_{dc}/2$. Cela permet d'approcher une forme d'onde beaucoup plus sinusoïdale.

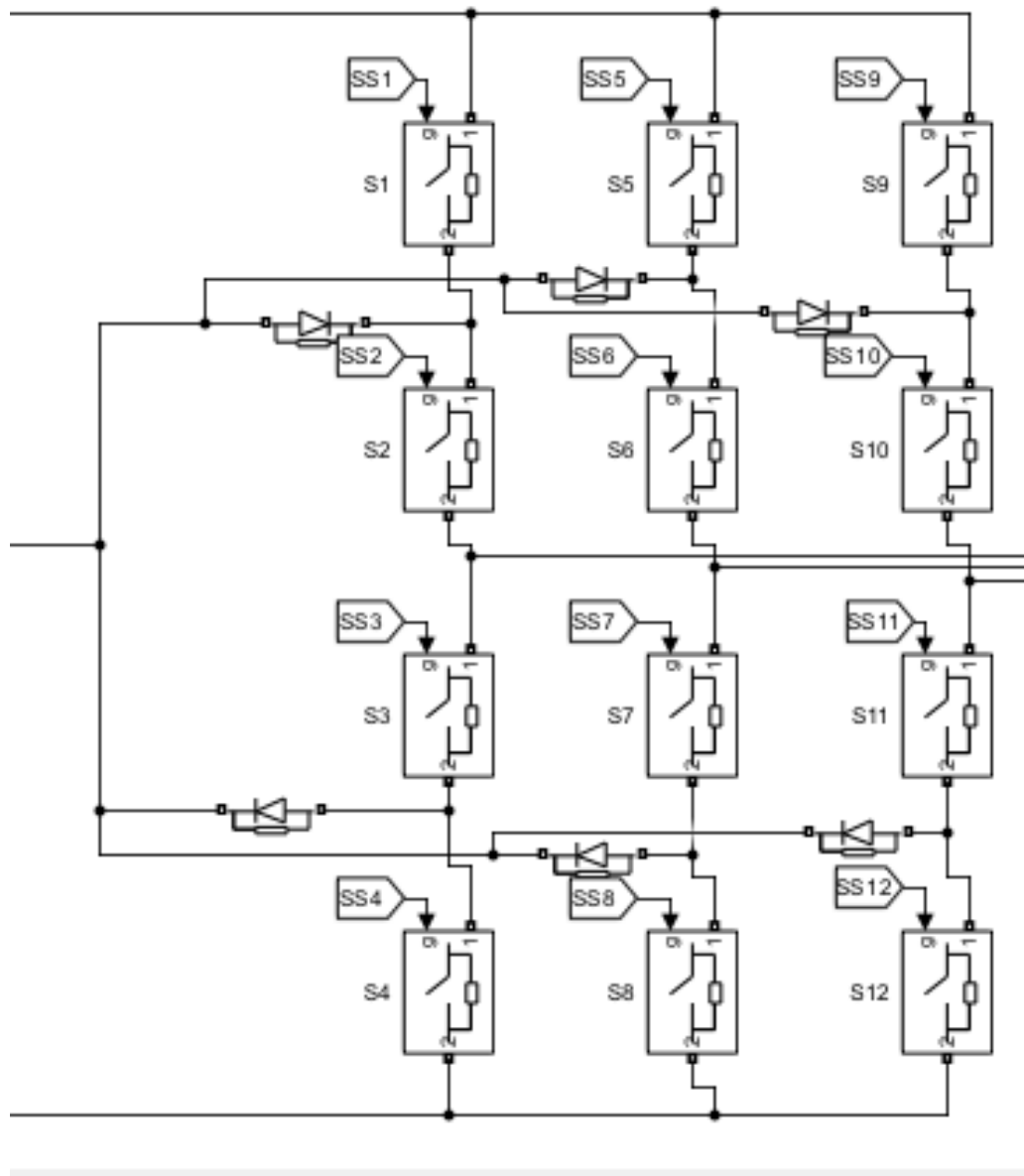


FIGURE 3.5 – Schéma Simulink de l'onduleur trois niveaux NPC

3.3.2 Performances de l'onduleur deux niveaux

Le tableau 3.5 présente les résultats pour l'onduleur 2N. Sans filtre, le THD atteint 38.66 % (figure 3.7), ce qui est inacceptable pour une injection réseau. L'ajout du filtre LC réduit ce THD à 2.82 % (figure 3.9), une valeur conforme aux normes (<5 % pour IEEE 519). Cependant, le courant fondamental chute à 44.48 A en raison des pertes et de l'impédance du filtre.

Paramètre	Sans filtre	Avec filtre LC
THD	38.66 %	2.82 %
Courant fondamental	8.315 A	44.48 A

TABLE 3.5 – Résultats de l'onduleur deux niveaux

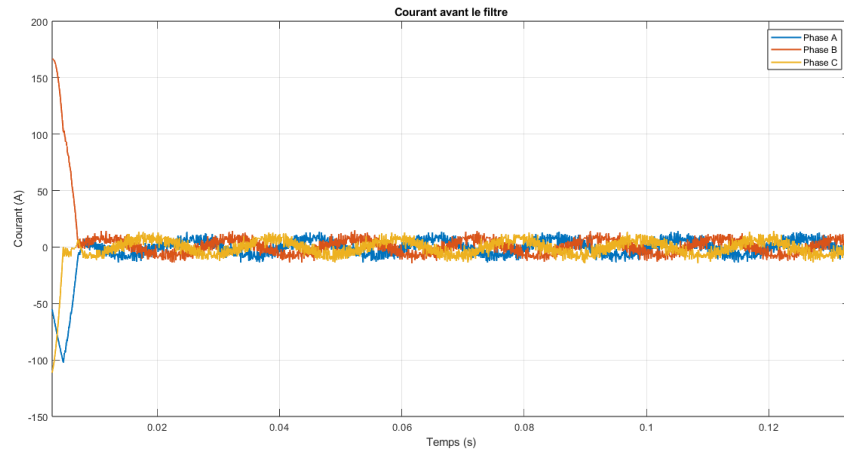


FIGURE 3.6 – Forme d’onde du courant (2 niveaux - avant filtrage)

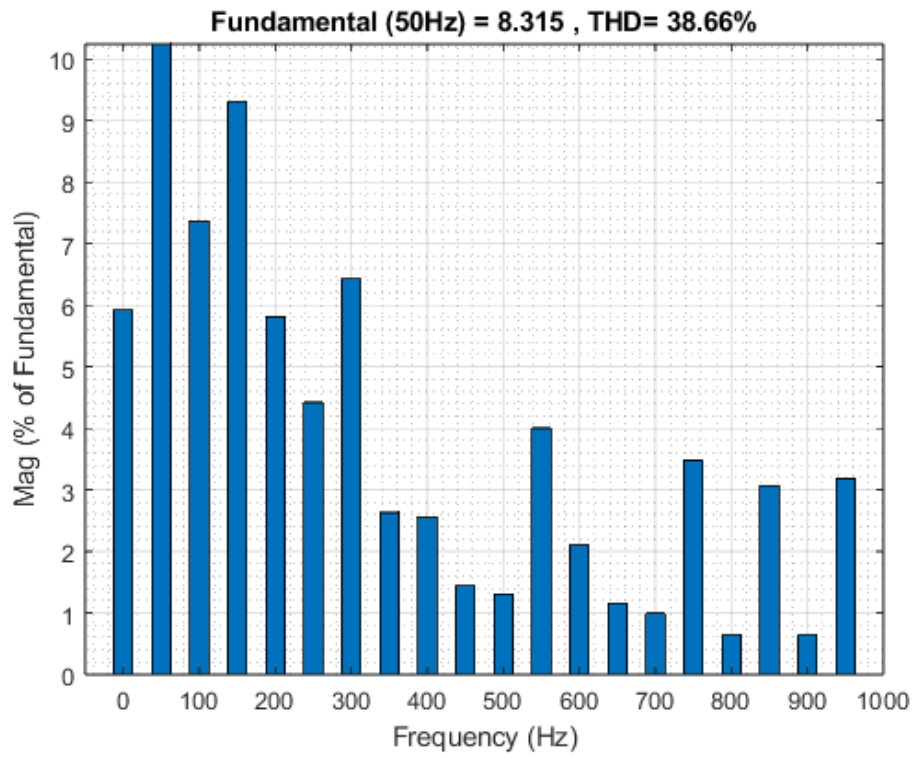


FIGURE 3.7 – Analyse FFT (2 niveaux - avant filtrage, THD = 38.66%)

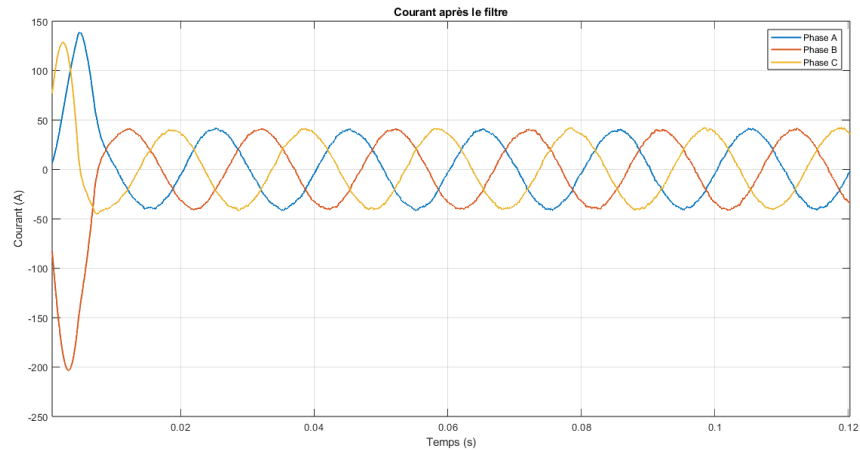


FIGURE 3.8 – Forme d’onde du courant (2 niveaux - après filtrage)

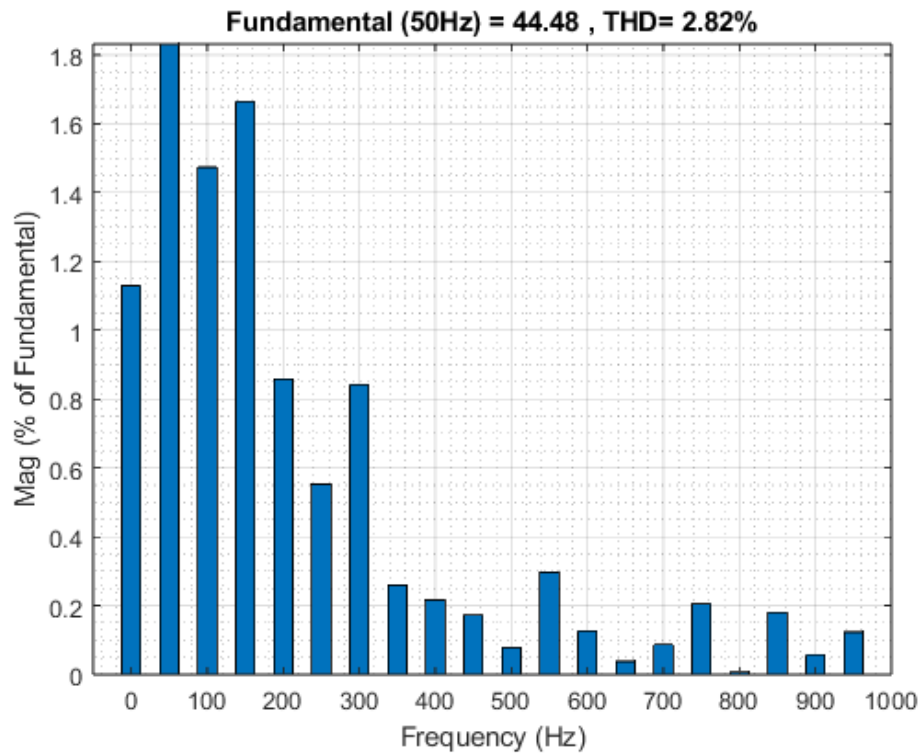


FIGURE 3.9 – Analyse FFT (2 niveaux - après filtrage, THD = 2.82%)

3.3.3 Performances de l’onduleur trois niveaux

Les résultats pour l’onduleur 3N sont bien supérieurs (tableau 3.6). Sans filtre, le THD n’est que de 10.07 % (figure 3.11) car la tension multi-niveaux génère naturellement moins d’harmoniques. Après filtrage, le THD atteint un excellent 0.94 % (figure 3.13), largement en dessous des exigences normatives. Le courant fondamental est également plus élevé (55.10 A), signe d’une meilleure efficacité de transfert d’énergie.

Paramètre	Sans filtre	Avec filtre LC
THD	10.07 %	0.94 %
Courant fondamental	9.963 A	55.10 A

TABLE 3.6 – Résultats de l'onduleur trois niveaux

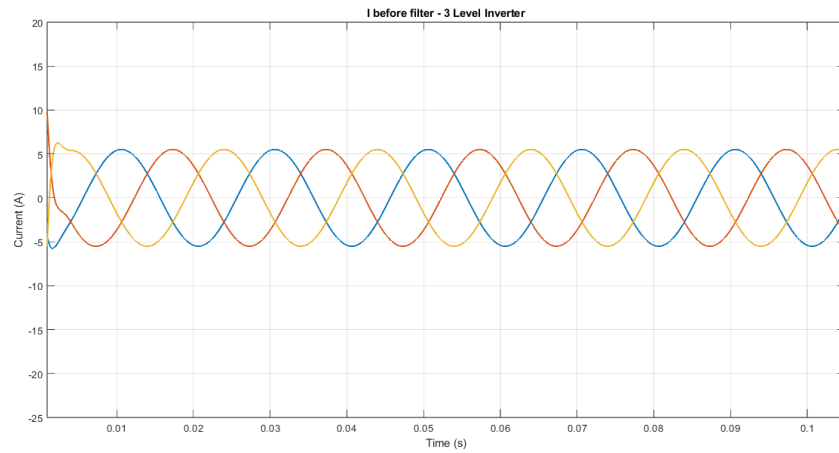


FIGURE 3.10 – Forme d'onde du courant (3 niveaux - avant filtrage)

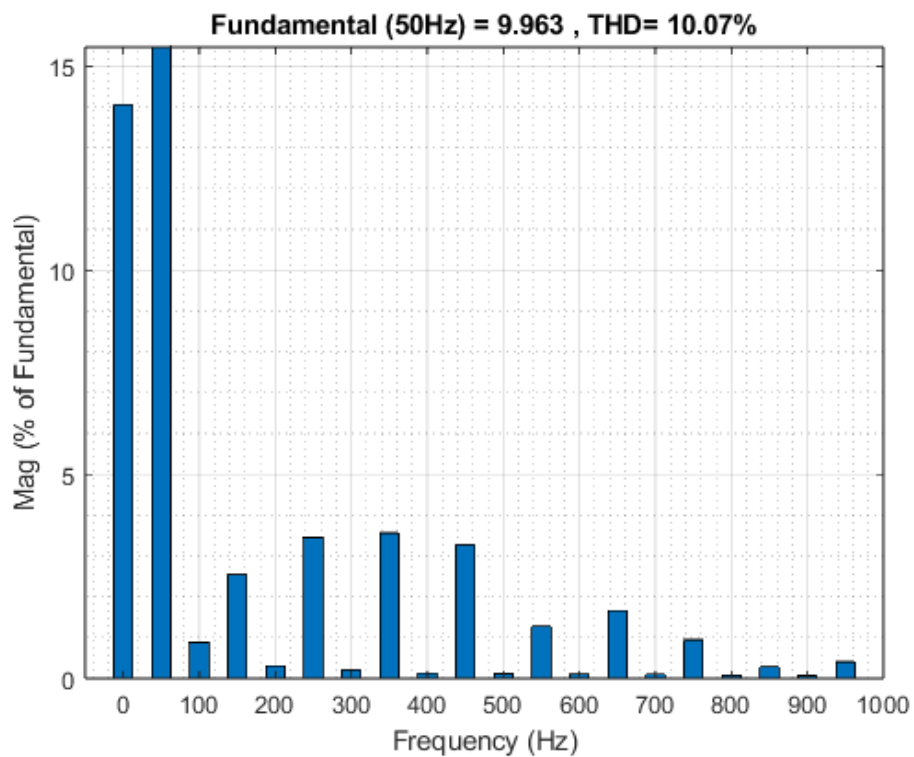


FIGURE 3.11 – Analyse FFT (3 niveaux - avant filtrage, THD = 10.07%)

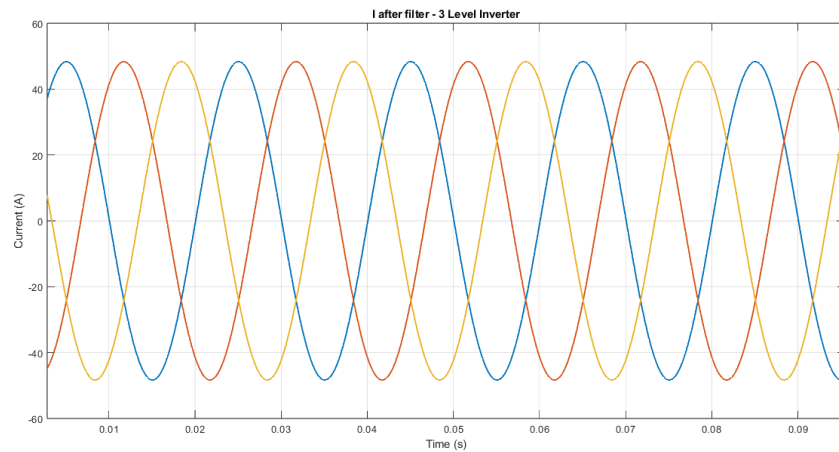


FIGURE 3.12 – Forme d'onde du courant (3 niveaux - après filtrage)

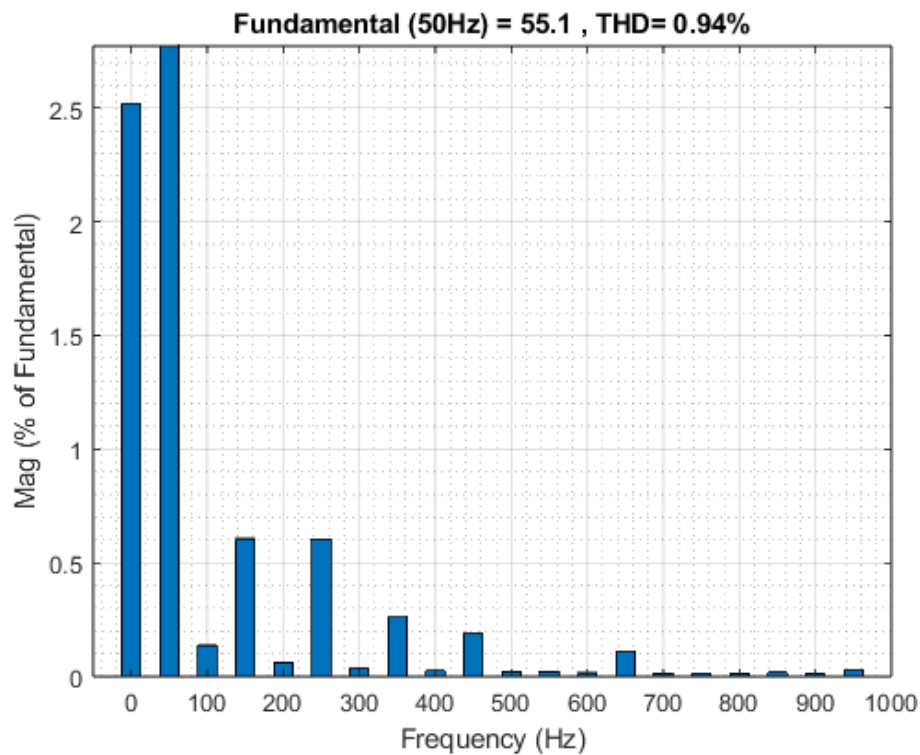


FIGURE 3.13 – Analyse FFT (3 niveaux - après filtrage, THD = 0.94%)

3.3.4 Comparaison détaillée des deux onduleurs

Le tableau 3.7 résume la comparaison. L'onduleur 3N améliore le THD de 74% sans filtre et de 67% avec filtre par rapport au 2N. La qualité d'onde devient "excellente", justifiant une complexité de commande modérée au regard des gains obtenus.

Critère	2 niveaux	3 niveaux NPC
THD (sans filtre)	38.66%	10.07%
THD (avec filtre LC)	2.82%	0.94%
Courant fondamental (avec filtre)	44.48 A	55.10 A
Qualité de l'onde	Acceptable	Excellente
Complexité	Simple	Modérée

TABLE 3.7 – Comparaison complète des deux onduleurs

3.4 Synthèse globale des améliorations

Le tableau 3.8 récapitule les gains cumulés en associant le MPPT flou et l'onduleur 3N. Les améliorations sont considérables tant sur la stabilité de l'extraction de puissance que sur la pureté du signal électrique injecté.

Amélioration	Valeur absolue	Gain relatif
Réduction des oscillations MPPT	De ± 1049.74 W à 0 W	100%
Amélioration de l'efficacité MPPT	De 88.39% à 99.88%	+13%
Réduction du THD (sans filtre)	De 38.66% à 10.07%	-74%
Réduction du THD (avec filtre)	De 2.82% à 0.94%	-67%

TABLE 3.8 – Synthèse des améliorations (valeur absolue et relative)

3.5 Discussion générale

3.5.1 Interprétation physique des résultats MPPT

L'algorithme flou élimine les oscillations car il ne fonctionne pas par perturbation systématique. Il utilise une base de règles qui lui permet de déduire la position relative du point de fonctionnement par rapport au MPP. Ainsi, une fois le MPP atteint, la commande devient statique. Ce comportement est idéal pour les installations photovoltaïques connectées au réseau où toute variation de puissance est préjudiciable.

3.5.2 Interprétation des résultats de l'onduleur

La réduction spectaculaire du THD entre l'onduleur 2N et 3N s'explique par le contenu harmonique de la tension de sortie. Un onduleur 3N produit une tension qui s'approche déjà d'une sinusoïde à trois paliers. Les harmoniques prédominantes sont reportées à des fréquences plus élevées (autour de $2 \times f_s$), ce qui les rend plus faciles à filtrer avec un filtre LC de taille réduite. Ainsi, l'association onduleur multiniveaux + filtre LC est une solution très efficace.

3.5.3 Conformité aux normes internationales

Le tableau 3.9 montre que l'onduleur 3N, même sans filtre, respecte la norme EN 50160 (THD < 8%) et s'approche de la norme IEEE 519 (THD < 5%). Avec le filtre, il les satisfait très largement. Cela valide l'intérêt de l'approche pour des applications industrielles.

Norme	Exigence (THD)	2 niveaux + filtre	3 niveaux + filtre
IEEE 519	< 5%	2.82% (conforme)	0.94% (conforme)
EN 50160	< 8%	2.82% (conforme)	0.94% (conforme)

TABLE 3.9 – Conformité aux normes internationales de qualité d'énergie

Conclusion

L'analyse des résultats de simulation permet de tirer les conclusions majeures suivantes :

1. **Sur le plan du MPPT :** L'algorithme à logique floue surpasse très nettement l'algorithme P&O. Il offre une stabilité parfaite (oscillations nulles), une efficacité de 99,88% et une dynamique équivalente. Il est donc recommandé pour toute application photovoltaïque nécessitant une extraction de puissance sans fluctuations.
2. **Sur le plan de la qualité d'énergie :** L'onduleur trois niveaux de type NPC réduit intrinsèquement le THD d'un facteur 4 par rapport à l'onduleur deux niveaux. Associé à un filtre LC, il produit un courant quasi parfait (THD = 0,94%), conforme aux normes les plus strictes (IEEE 519, EN 50160). Le courant fondamental est également plus élevé, signe d'un meilleur rendement global.
3. **Sur le plan de la synergie :** L'association du MPPT flou (stabilité de la puissance extraite) et de l'onduleur trois niveaux (qualité du signal injecté) constitue une solution complète, robuste et performante pour l'interface entre un générateur photovoltaïque et le réseau électrique.

Les perspectives ouvertes par ce travail incluent l'étude de l'onduleur à cinq niveaux, l'implémentation sur cible DSP (Digital Signal Processor) pour validation expérimentale, et la prise en compte des défauts du réseau (creux de tension, harmoniques amont).

Conclusion Générale

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique, en relevant deux défis majeurs : d'une part, l'optimisation de l'extraction de la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque, et d'autre part, l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique injectée, notamment la réduction du taux de distorsion harmonique (THD).

L'étude menée a permis de développer une chaîne de conversion complète, allant du panneau solaire jusqu'au réseau, modélisée sous l'environnement MATLAB/Simulink. Après avoir posé les fondements théoriques et technologiques dans le premier chapitre, et présenté la méthodologie et les modèles mathématiques dans le deuxième chapitre, le troisième chapitre a été consacré à la simulation et à l'analyse critique des résultats.

Les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

1. **Concernant l'optimisation du MPPT** : L'algorithme à logique floue (FLC) s'est révélé très supérieur à l'algorithme conventionnel P&O. En effet, si le P&O présente des oscillations résiduelles de l'ordre de $\pm 1049,74$ W autour du point de puissance maximale (MPP), ce qui limite son efficacité à 88,39%, l'algorithme flou élimine complètement ces oscillations (0 W) et atteint un rendement exceptionnel de 99,88%. Le temps de convergence est resté quasi identique (0,20 ms contre 0,21 ms). Cet apport est fondamental pour réduire le stress sur les composants du convertisseur et stabiliser la production d'énergie.
2. **Concernant la qualité de l'énergie** : L'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC surpasse très nettement l'onduleur conventionnel à deux niveaux. Sans filtrage, le THD passe de 38,66% (2N) à seulement 10,07% (3N), soit une réduction de 74%. Avec un filtre LC correctement dimensionné, le THD de l'onduleur NPC atteint 0,94%, une valeur bien inférieure aux exigences des normes internationales IEEE 519 (5%) et EN 50160 (8%). De plus, le courant fondamental injecté est plus élevé (55,10 A contre 44,48 A), ce qui témoigne d'un meilleur transfert d'énergie.
3. **Concernant la synergie des deux solutions** : L'association de la commande MPPT par logique floue (pour l'efficacité énergétique et la stabilité) avec l'onduleur multiniveaux NPC (pour la qualité du signal) constitue une solution globale, robuste et performante. Cette architecture répond efficacement aux problématiques actuelles d'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux intelligents (smart grids).

En conclusion, ce travail a démontré, par la simulation, qu'il est tout à fait possible de concilier

haute efficacité énergétique et haute qualité d'injection réseau. Les résultats obtenus confirment le bien-fondé des deux approches proposées et ouvrent la voie à plusieurs perspectives prometteuses

Ainsi, ce mémoire apporte une contribution utile à la conception des systèmes photovoltaïques de nouvelle génération, alliant performance, fiabilité et respect des normes de qualité d'énergie.

Références

- [1] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed. Chichester, UK : Wiley, 2011.
- [2] A. S. Al-Ezzi and M. N. M. Ansari, "Photovoltaic solar cells : A review," *Applied System Innovation*, vol. 5, no. 4, 2022.
- [3] S. Motahhir, A. El Ghzizal, and A. Derouich, "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM," in *Proc. Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes*, Fès, Morocco, 2015.
- [4] A. Benkassis, "Étude et modélisation d'un panneau photovoltaïque," Thesis, Univ. Guelma, Algeria, 2024.
- [5] S. Bana and R. P. Saini, "A mathematical modeling framework to evaluate photovoltaic systems," *Energy Reports*, vol. 2, pp. 80-107, 2016.
- [6] S. Shongwe and M. Hanif, "Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 3, pp. 938-946, 2015.
- [7] M. B. Danoune et al., "Characterization of photovoltaic panel using diode models," in *Proc. International Conference on Communications and Electrical Engineering (ICCEE)*, 2018.
- [8] M. G. Villalva, J. R. Espindola, and T. G. de Siqueira, "Comprehensive approach to the modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, 2009.
- [9] K. Ishaque, Z. Salam, and H. Taheri, "Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 2, pp. 586-594, 2011.
- [10] H. Patel and V. Agarwal, "Matlab-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, 2008.
- [11] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations," *Solar Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614-624, 2009.
- [12] A. Sayyah, J. I. Horenstein, and M. K. Mazumder, "Yield loss of photovoltaic panels caused by surface soiling—A review," *Solar Energy*, vol. 107, pp. 559-604, 2014.
- [13] T. Bhattacharya, A. K. Chakraborty, and K. Pal, "Effects of environmental factors on photovoltaic device performance," *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 164-175, 2014.
- [14] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.
- [15] D. Sera, R. Teodorescu, J. S. Christiansen, and U. Borup, "Optimization of the photovoltaic system efficiency by MPPT," in *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007,

pp. 1983-1988.

[16] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, "A survey of the most used MPPT methods : Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 823-848, 2015.

[17] M. A. G. de Brito, L. P. Sampaio, G. e. A. Luigi, G. A. e. Silva, and C. A. Canesin, "Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications," in *Proc. International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2011, pp. 99-104.

[18] N. Femia et al., *Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems*. CRC Press, 2017.

[19] A. K. Abdelsalam et al., "High-performance adaptive perturbation and observation MPPT technique for photovoltaic system," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, 2011.

[20] K. S. Tey et S. Mekhilef, "Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation," *Solar Energy*, vol. 101, 2014.

[21] M. A. Elgendy et al., "Assessment of P&O and incremental conductance MPPT algorithms with direct control," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, 2012.

[22] S. Saravanan et N. R. Babu, "Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, 2016.

[23] J. Ahmed et Z. Salam, "An enhanced adaptive P&O MPPT for fast and efficient tracking under varying environmental conditions," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 3, 2018.

[24] S. Saravanan and N. R. Babu, "Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 192-204, 2016.

[25] D. Pilakkat and S. Kanthalakshmi, "An improved P&O algorithm integrated with ABC for photovoltaic systems under partial shading conditions," *Solar Energy*, vol. 187, pp. 2-11, 2019.

[26] S. Mohanty, B. Subudhi, and P. K. Ray, "A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 181-188, 2016.

[27] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press, 2017.

[28] F. Z. Peng, "Application issues of active power filters," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no. 5, pp. 21-30, 1998.

[29] M. El-Habrouk, M. K. Darwish, and P. Mehta, "Active power filters : A review," *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 147, no. 5, pp. 403-413, 2000.

[30] ACCA Software, "Photovoltaic system diagram : the useful design guide," Biblus, [Online]. Available : <https://biblus.accasoftware.com/en/photovoltaic-system-diagram-the-useful-design->

guide/. [Accessed : Apr. 23, 2026].

[31] A. Kumari and P. Kumar, "Comparative analysis of P&O and incremental conductance MPPT techniques for photovoltaic system," in *2014 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, Shanghai, China, 2014, pp. 1-5. doi : 10.1109/PEAC.2014.7037872.

[31] GeeksforGeeks, "3-Phase Inverter - Types, Working and Applications," *GeeksforGeeks*, Nov. 27, 2023. [Online]. Available : <https://www.geeksforgeeks.org/electrical-engineering/3-phase-inverter/>.

[32] "Boost Converter : Working Principle, Modes Applications," Tenxer Labs Resources, [Online]. Available : <https://tenxerlabs.com/resources/blogs/boost-converter/>. [Accessed : June 5, 2026].