



Department: Electrical Engineering  
Applied Automation and Industrial Diagnostic Laboratory

Order N°: ...../2023

Defense authorization N°: ...../2023

## DOCTORAL THESIS

With a view to obtaining the diploma of Doctoral in sciences

Presented by:

**Mohamed BOUKHALFA**

Branch: Electrotechnique

Specialty: Electrotechnique

### Topic

**Optimization and energy management of a renewable energy system**

Supported, on 26 /07 / 2023, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr Ahmed GUEDDIM	Professor	University of Djelfa	President
Mr Amar BENAÏSSA	Professor	University of Djelfa	Supervisor
Mr Abdelkader KHOUDIRI	MCB	University of Djelfa	Co-Supervisor
Mr Benalia M'HAMMEDI	MCA	University of Djelfa	Examiner
Mr Abdelkarim BOUANANE	MCA	University of Saida	Examiner
Mr Abdelaziz YOUCEF	MCA	University of Saida	Examiner



Département : Génie Electrique

N° d'Ordre : . .... / 2022

Autorisation de Soutenance N° ...../2022

## THESE

Présenté pour l'obtention du diplôme de doctorat science

Par : Boukhalfa Mohamed

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

### Thème

**Optimisation et gestion d'énergie d'un système d'énergie d'un système**

Soutenue publiquement, le ... /... /2023, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement de rattachement	Désignation
Mr Gueddime Ahmed	Pr	Université de Djelfa	Président
Mr Benaissa Amar	Pr	Université de Djelfa	Directeur de thèse
Mr Khoudiri Abdelkader	MCB	Université de Djelfa	Co-directeur de thèse
Mr M'hammedi Benalia	MCA	Université de Djelfa	Examineur
Mr Bouanane Abdelkrim	MCA	Université de Saida	Examineur
Mr Youcef Abdelaziz	MCA	Université de Saida	Examineur

## **Abstract**

This thesis presents an advanced optimized control technique for a grid-connected hybrid energy system (HES) based on a solid oxide fuel cell (SOFC) and a photovoltaic (PV) panel in a distributed power generation system. A conventional full sliding mode control and a fuzzy-PI sliding mode proposed for a system operation and power management mode (UPC mode) are both discussed. The proposed technique is based on a combination of classical control and fuzzy artificial intelligence at the power and current setting. The obtained results show that the optimized fuzzy-PI control is better than the classical control in terms of power, response time and robustness to disturbances in energy production and consumption. The fuzzy algorithm gave optimal gain values with better performance than the sliding mode control.

**Keywords :** Hybrid energy systems; Solid oxide fuel cell (SOFC); Photovoltaic (PV) generator; Sliding mode control; Fuzzy-PI control; Power grid.

## **Résumé**

Cette thèse présente une technique de contrôle avancée optimisée pour un système énergétique hybride (HES) connecté au réseau, basé sur une pile à combustible à oxyde solide (SOFC) et un panneau photovoltaïque (PV) dans un système de production d'énergie distribuée. Une commande classique en mode glissant complet et un mode glissant fuzzy-PI proposé pour un mode de fonctionnement du système et de gestion de la puissance (mode UPC) sont tous deux abordés. La technique proposée est basée sur une combinaison de contrôle classique et d'intelligence artificielle floue au niveau du réglage de la puissance et du courant. Les résultats obtenus montrent que la commande optimisée en mode glissant (fuzzy-PI) est meilleure que la commande classique en termes de puissance, de temps de réponse et de robustesse face aux perturbations de la production et de la consommation d'énergie. L'algorithme flou a donné des valeurs de gain optimales avec une meilleure performance que le contrôle par mode glissant.

**Mots-clés :** Systèmes énergétiques hybrides ; Pile à combustible à oxyde solide (SOFC) ; Générateur photovoltaïque (PV) ; Contrôle en mode glissant ; Contrôle flou-PI; Réseau électrique.

## ملخص :

على الرغم من أن تقنية التحكم PI هي من بين أكثر طرق التحكم شيوعاً في أنظمة الطاقة الكهروضوئية (PV)، إلا أنه تجاوزت حدودها وتجاوزها في الوضع التالي للمسار. هذا العيب الرئيسي لا يزال مشكلة مفتوحة. في هذه الأطروحة ، تم تطوير التحكم المباشر في الطاقة (DPC) لنظام كهروضوئي متصل بالشبكة ثلاثية الأطوار على أساس متحكم PI متغير الكسب (VGPI) للقضاء على القفزات والقفزات لوحدة التحكم PI الكلاسيكية ، من ناحية ، ومن ناحية أخرى درسنا تقنية تحكم متقدمة محسنة لنظام طاقة هجين متصل بالشبكة (HES) يعتمد على خلية وقود أكسيد صلب (SOFC) و مولد كهروضوئي (PV) في نظام توزيع الطاقة. تمت مناقشة كل من التحكم في وضع الانزلاق الكامل الكلاسيكي ووضع الانزلاق fuzzy-PI المقترح لتشغيل النظام ووضع إدارة الطاقة (وضع UPC). تعتمد التقنية المقترحة على مزيج من التحكم الكلاسيكي والذكاء الاصطناعي الضبابي على مستوى القوة والتعديل الحالي. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن التحكم الأمثل في الوضع الانزلاقي الضبابي (fuzzy-PI) أفضل من التحكم الكلاسيكي من حيث القوة ووقت الاستجابة والمتانة ضد الاضطرابات في إنتاج الطاقة واستهلاكها. أعطت الخوارزمية الضبابية قيم كسب مثالية مع أداء أفضل من التحكم في الوضع المنزلق.

**كلمات مفتاحية :** أنظمة الطاقة الهجينة ، خلية وقود الأكسيد الصلب (SOFC) ، مولد الطاقة الكهروضوئية (PV) ، التحكم في الوضع الانزلاقي ، التحكم Fuzzy-PI ، شبكة الطاقة.

# Table des Matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I Généralités sur les Energies Renouvelables en vue de leur Application dans les Systèmes Energétiques Hybrides</b>	<b>5</b>
<b>I.1 Introduction</b>	<b>5</b>
<b>I.2 Sources des énergies renouvelable</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1 Energie hydraulique</b>	<b>6</b>
<b>I.2.2 Energie géothermique</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3 Energie de biomasse</b>	<b>7</b>
<b>I.2.4 Energie Solaire photovoltaïque</b>	<b>8</b>
<i>I.2.4.1 Effet photovoltaïque</i>	<b>8</b>
<i>I.2.4.2 Cellule photovoltaïque.</i>	<b>9</b>
<i>I.2.4.3 Module et champ photovoltaïque</i>	<b>10</b>
<i>I.2.4.4 Technologies de Production de cellules et de modules photovoltaïques</i>	<b>11</b>
<i>I.2.4.5 Normes et spécifications concernant les modules photovoltaïques</i>	<b>12</b>
<i>I.2.4.6 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque</i>	<b>12</b>
<i>I.2.4.7 Avantages et Inconvénients des sources photovoltaïque</i>	<b>13</b>
<b>I.2.5 Energie éolienne</b>	<b>14</b>
<b>I.2.5.1 Principe de conversion d'énergie éolienne</b>	<b>14</b>
<b>I.2.5.2 Avantages de l'énergie éolienne,</b>	<b>14</b>
<b>I.2.5.3 Inconvénients de l'énergie éolienne</b>	<b>15</b>
<b>I.3 Impact de l'intégration des énergies renouvelables sur un système électrique</b>	<b>16</b>
<b>I.4 Développement des énergies renouvelables en Algérie</b>	<b>16</b>

<b>I.5 Les piles à combustible (Fuel Cell)</b>	<b>17</b>
<b>I.5.1 Définition</b>	<b>17</b>
<b>I.5.2 Structure générale</b>	<b>17</b>
<i>I.5.2.1 Les électrodes (anode et cathode)</i>	<b>18</b>
<i>I.5.2.2 L'électrolyte</i>	<b>19</b>
<i>I.5.2.3 Les plaques bipolaires</i>	<b>19</b>
<i>I.5.2.4 Les couches de diffusion</i>	<b>20</b>
<b>I.5.3 Principe de fonctionnement</b>	<b>20</b>
<b>I.5.4 Les différents types de piles à combustible</b>	<b>21</b>
<i>I.5.4.1 La pile alcaline</i>	<b>22</b>
<i>I.5.4.2 La pile à carbonate fondu (MCFC)</i>	<b>22</b>
<i>I.5.4.3 La pile à oxyde solide (SOFC).</i>	<b>23</b>
<i>I.5.4.4 La pile à acide phosphorique (PAFC)</i>	<b>23</b>
<i>I.5.4.5 La pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC)</i>	<b>24</b>
<i>I.5.4.6 La pile à méthanol direct (DMFC)</i>	<b>24</b>
<i>I.5.4.7 Synthèse</i>	<b>24</b>
<b>I.5.5 Avantages et inconvénients des piles à combustible</b>	<b>25</b>
<b>I.6 Conclusion</b>	<b>26</b>
<b>Chapitre II</b>	<b>Modélisation des Systèmes Energétiques</b>
	<b>31</b>
	<b>Hybrides</b>
<b>II.1 Introduction</b>	<b>31</b>
<b>II.2 Structure du système photovoltaïque connecté au réseau électrique</b>	<b>31</b>
<b>II.2.1 Classification d'un système photovoltaïque</b>	<b>31</b>
<i>II.2.1.1 Systèmes photovoltaïques autonomes</i>	<b>32</b>
<i>II.2.1.2 Système photovoltaïque connecté au réseau</i>	<b>33</b>
<i>II.2.1.3 Applications photovoltaïques</i>	<b>35</b>
<b>II.3 Modélisation du générateur photovoltaïque</b>	<b>36</b>
<b>II.3.1. Caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque</b>	<b>38</b>
<i>II.3.1.1 Influence de l'ensoleillement sur les courbes I-V et P-V</i>	<b>39</b>

<i>II.3.1.2 Influence de la température sur les courbes I-V et P-V</i>	40
<b>II.3.2 Caractéristique du module photovoltaïque</b>	40
<b>II.4 Modélisation simple des piles à combustible</b>	40
<b>II.4.1 Raisons du choix la pile à combustible de type SOFC</b>	40
<b>II.4.2 Modélisation de la pile à combustible (SOFC)</b>	41
<i>II.4.2.1 Calcul des pressions partielles</i>	43
<i>II.4.2.2 Rapport optimal entre les débits des réactants</i>	45
<b>II.5 Modélisation des convertisseurs (DC/DC)</b>	47
<b>II.5.1 Hacheur (Boost)</b>	48
<b>II.5.2 Hacheur (buck-Boost)</b>	50
<b>II.6 Modélisation des convertisseurs (DC/AC)</b>	52
<b>II.6.1 Onduleur Neutral Point Clamping (NPC) à trois niveaux</b>	53
<i>II.6.1.1 Structure générale de l'onduleur à trois niveaux</i>	53
<i>II.6.1.2 Modélisation de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC</i>	54
<i>II.6.1.2.1 Fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux</i>	56
<i>II.6.1.2.2 Modèle de connaissance et de commande</i>	56
<i>II.6.1.2.3 Modélisation des valeurs instantanées</i>	58
<b>II.7 Conclusion</b>	62
<b>Chapitre III Stratégie de commande Systèmes Energétiques</b>	68
<b>Hybrides et Amélioration des performances du contrôle DPC</b>	
<b>basé sur un contrôleur VGPI appliqué à un système PV connecté</b>	
<b>au réseau</b>	
<b>III.1. Stratégie de commande Systèmes Energétiques Hybrides</b>	68
<b>III.1.1 Introduction</b>	68
<b>III.1.2 Technique MPPT</b>	69
<i>III.1.2.1 Algorithme 'Perturb and Observe' (P&amp;O)</i>	69
<i>III.1.2.2 Algorithme 'Conductance incrémentielle' (INC)</i>	71

<b>III.2 Amélioration des performances du contrôle DPC basé sur un contrôleur VGPI appliqué à un système PV connecté au réseau</b>	<b>72</b>
<b>III.2.1 Introduction</b>	<b>72</b>
<b>III.3.2 Structure de contrôle des systèmes PV triphasés à deux étapes connectés au réseau</b>	<b>73</b>
<i>III.2.2.1 Présentation du système</i>	<b>73</b>
<i>III.2.2.2 Contrôleur de convertisseur Boost</i>	<b>74</b>
<i>III.2.2.3 Contrôle direct de la puissance basé sur une table de consultation</i>	<b>74</b>
III.2.2.3.1. Contrôle de puissance direct DPC	<b>75</b>
III.2.2.3.2 Estimation de puissance instantanée	<b>75</b>
III.2.2.3.3 La position angulaire $\theta_n$	<b>76</b>
III.2.2.3.4 Détermination du secteur	<b>76</b>
<b>III.2.3 Régulation de la tension <math>V_{dc}</math> de l'onduleur.</b>	<b>77</b>
<b>III.2.4 Synchronisation avec le réseau</b>	<b>77</b>
<i>III.2.4.1 Principe de la PLL</i>	<b>77</b>
<b>III.2.5 Contrôleur VGPI</b>	<b>78</b>
<i>III.2.5.1 paramètre du contrôleur VGPI</i>	<b>78</b>
<b>III.2.6 Simulation, résultats et discussion</b>	<b>80</b>
<b>III.3 Conclusion</b>	<b>80</b>
<b>Chapitre IV Optimisation et gestion d'un système hybride</b>	<b>87</b>
<b>IV.1 Introduction</b>	<b>87</b>
<b>IV.2 Description du système énergétique étudié</b>	<b>87</b>
<b>IV.2.1 Stratégie de gestion de puissance</b>	<b>89</b>
<b>IV.3 Commande par mode glissant de l'onduleur NPC à trois niveaux</b>	<b>90</b>
<b>IV.3.1 Modélisation de l'onduleur NPC dans le plan <math>(d,q)</math></b>	<b>90</b>
<b>IV.3.2 Modèle de l'onduleur à trois niveaux dans le plan <math>(dq)</math></b>	<b>91</b>
<b>IV.3.3 Stratégie de contrôle</b>	<b>93</b>
<b>IV.3.4 Modulation vectorielle spatiale à trois niveaux</b>	<b>95</b>
<b>IV.4 Stratégie de gestion optimisée du système étudié</b>	<b>96</b>

<b>IV.5 Stratégie de commande proposée</b>	<b>97</b>
<b>IV.5.1 Contrôleur Fuzzy-PI proposé</b>	<b>97</b>
<i>IV.5.1.1 Architecture du contrôleur flou</i>	<b>97</b>
<i>IV.5.1.2 Conception du contrôleur Fuzzy-PI</i>	<b>98</b>
<b>IV.5.2 Conception d'un contrôleur à mode glissant flou</b>	<b>99</b>
<b>IV.6 Simulation du SEH sous des conditions météorologiques variables</b>	<b>102</b>
<b>IV.6.1 Mode du contrôle de l'unité de puissance (UPC)</b>	<b>102</b>
<b>IV.7 Conclusion</b>	<b>105</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>108</b>

## Liste des Figures

Figure I.1. Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	6
Figure I.2. Principe de fonctionnement d'énergie géothermie.	7
Figure I.3. Principe de fonctionnement d'énergie biomasse	7
Figure 1.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	10
Figure 1.5. Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible	18
Figure I.6 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible	21
Figure II.1 Système photovoltaïque autonome.	33
Figure II.2. Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique	34
Figure II.3 Classification des systèmes photovoltaïques.	35
Figure II.4. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire	36
Figure II.5. Caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque dans les conditions standards.	38
Figure II.6. Effet de l'éclairement sur (a) la courbe I-V et (b) la courbe P-V.	39
Figure II.7. Effet de la température (T) sur (a) la courbe I-V et (b) la courbe P-V.	39
Figure II.8. Courbe de polarisation théorique d'une pile SOFC.	42
Figure II.9. Modèle d'une cellule SOFC	43
Figure II.10. Comportement du gaz dans un canal.	44
Figure II.11. Modèle dynamique de la pile SOFC.	46
Figure II.12. La forme de variation en fonction du rapport cyclique.	47
Figure II.13. Circuit fonctionnel d'un convertisseur Boost.	48
Figure II.14. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur K est fermé.	49
Figure II.15. Circuit fonctionnel d'un convertisseur Buck	51
Figure II.16. Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck.	52

Figure II.17. Structure Générale de l'onduleur à trois niveaux.	54
Figure II.18. Différentes configurations du bras K de l'onduleur à trois niveaux.	56
Figure III.1. Système PV avec commande MPPT.	69
Figure III.2. Principe de la MPPT avec la méthode P&O	70
Figure III.3. Organigramme de la méthode P&O.	71
Figure III.4. Principe de la MPPT avec la méthode INC	72
Figure III.5. Système PV triphasé associé au réseau avec contrôle P&O MPPT et DPC basé sur un contrôleur à gain variable (VGPI)	73
Figure III.6 Principe de la commande DPC	75
Figure III.7. Plan ( $\alpha$ , $\beta$ ) divisé en 12 secteurs.	77
Figure III.8. Régulateur VGPI	78
Figure III.9. (a) Radiation solaire (b) Courant photovoltaïque.	81
Figure III.10. Résultats de simulation du DPC proposé avec le contrôleur VGPI	81
Figure III.11. La tension $V_{dc}$ avec régulateur VGPI et PI.	82
Figure III.12 Spectre des harmoniques (a) avec contrôleur VGPI (b) avec contrôleur PI	82
Figure IV.1. Structure du SEH étudié.	87
Figure IV.2. Structure du SEH étudié relié au réseau avec la commande proposée.	98
Figure IV.3. Onduleur NPC à trois niveaux	90
Figure IV.4. Schéma de la boucle à verrouillage de phase (PLL).	91
Figure IV.5. Diagrammes vectoriels spatiaux d'un onduleur multiniveaux.	96
Figure IV.6. Architecture du contrôleur flou.	98
Figure IV.7. Structure du contrôleur Fuzzy-PI.	101
Figure IV.8. Le contrôleur à mode glissant flou-pi.	101
Figure IV.9. Profil d'irradiation ( $W/m^2$ ).	103
Figure IV.10. Profil de température ( $^{\circ}C$ )	103
Figure IV.11. Pressions de ( $H_2, O_2$ , et $H_2O$ ).	103
Figure IV.12. Flux de ( $H_2$ et $O_2$ ).	103
Figure IV.13. Tensions de sortie (PV/SOFC).	104
Figure IV.14. Courants de sortie PV/SOFC.	104
Figure IV.15. Courants de sortie de l'onduleur	104
Figure IV.16. tension de sortie de l'onduleur (entre phases).	104

Figure IV.17. tension de sortie de l'onduleur	104
Figure IV.18. puissances des SHE	104
Figure V.19. Tension du bus DC.	105
Figure V.20. tension de sortie de réseau et de charge	105
Figure V.21. Courants de sortie du réseau .	105
Figure V.22. Courants de charge.	105
Figure V.23. Effet de la température (T) sur la courbe I-V et P-V à $1000 \text{ W/m}^2$	105
Figure V.24. Effet de l'éclairement sur sur la courbe I-Vet P-Và $T=25^0$	105

## Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Différentes technologies des cellules photovoltaïques	11
Tableau I.2. Comparaison des différents types des piles à combustible	25
Tableau II.1. Configurations possibles en fonction de $V_K$	56
Tableau II.2. Commutation complémentaire des états de commutation d'interrupteurs	57
Tableau III.1. tableau de changement de secteur	74
Tableau III.2. Paramètres du système étudié.	80
Tableau IV.2. Paramètres obtenus en utilisant les régulateurs PI et VGPI	82
Tableau IV.1. Règles IF-THEN pour Fuzzy-PI et CMG.	98

## Liste des Symboles

GPV	Générateur Photovoltaïque
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
P&O	Perturbe et Observe
INC	incremental conductance
DC/DC	Hacheur Courant Continu/Courant Continu
SEH	Systèmes Énergétiques Hybrides
ENR	Energies renouvelables
PAC	Pile à Combustible
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
AFC	Alkaline Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
CC/CA	Convertisseur de tension (Courant Continu/Courant Alternative)
PI	Proportionnel Integral
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
BCT	Boucle de Contrôle de la Tension
BCTC	Boucles de Contrôle de la Tension et du Courant
CMG	Commande par Mode de Glissement
NPC	Neutral Point Clamping
PWM	Pulse Width Modulation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation
THD	Total Harmonic Distorsion
PLL	Phase Lock Loop

UPC	Unit Power Control
VSI	Voltage Source Inverter
$P_{H_2}$	Pression partielle d'hydrogène (Atm)
$P_{O_2}$	Pression partielle d'oxygène (Atm)
$P_{H_2O}$	Pression d'eau partielle (Atm)
$q_{H_2}$	Débit molaire d'hydrogène (Kmol/s)
$q_{O_2}$	Débit molaire d'oxygène (Kmol/s)
T	Température absolue (K)
$K_r$	Constante = $996 \cdot 10^{-6}$ (Kmol/sA)
F	Constante de Faraday= 96487 (C/mol)
$r_{HO}$	Rapport d'hydrogène à l'oxygène
$T_f$	Temps de réponse du processeur de carburant (s)
N	Nombre de cellules dans la pile
$T_e$	Temps de réponse électrique (s)



## Introduction Générale

La consommation irrationnelle d'énergie s'est produite au cours du siècle dernier et continue d'augmenter dans toutes les régions du monde. Alors que notre demande en énergie va continuer à augmenter dans les années à venir, la remise en question des ressources est essentielle pour un véritable développement durable et respectueux de l'environnement [1].

Au vu des problèmes environnementaux causés par l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et les émissions de gaz à effet de serre liées à l'exploitation de ces ressources, d'autres sources d'énergie alternatives sont et doivent être développées. L'énergie renouvelable est une alternative écologique à l'énergie fossile et à l'énergie nucléaire, qui ont toutes d'immenses avantages d'être naturelles, inépuisables, respectueuses de l'environnement et parfaitement adaptées à la production distribuée.

Il existe actuellement plusieurs sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'énergie de la géothermie, biomasse, du vent et du soleil. Le principal atout de cette catégorie d'énergie dite renouvelable est que leur utilisation n'affecte pas le milieu extérieur en matière d'émission de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, NO) et participent ainsi à la réduction de la croissance de la température de la planète [2].

La production d'énergie photovoltaïque est un type d'énergie renouvelable permettant l'obtention de l'électricité via la conversion de la lumière du soleil à l'aide de panneaux photovoltaïques, constitués de cellules solaires interconnectées. L'effet local de l'énergie solaire est très faible. Ses installations sont silencieuses, discrètes et ne causant pas de nuisance visuelle [3].

L'Algérie est l'un des pays qui s'est imposé comme un pays leader dans le solaire et l'éolien. Le potentiel d'énergies renouvelables du pays étant dominé par l'énergie solaire, l'Algérie cherche à exploiter cette énergie dans l'économie non seulement par la création de richesses et d'industries génératrices d'emplois, mais aussi par le lancement de son programme de développement des énergies renouvelables. En fait, c'est une véritable opportunité de développement socio-économique. Du point de vue de l'efficacité énergétique, l'une des exigences pour le photovoltaïque est de produire des modules photovoltaïques d'ici 2030 générant environ 13 500 MW [4].

Un système d'énergie solaire présente de nombreux avantages. Il attire de plus en plus l'attention en raison de son faible entretien, de son absence de bruit et de sa pollution. Pour une production d'énergie photovoltaïque maximale, il est nécessaire de tirer le meilleur parti de l'équipement photovoltaïque.

Une propriété fondamentale des panneaux solaires est qu'ils ne délivrent le maximum de puissance que pour une tension et un courant donnés correspondant à ce que l'on appelle le point de puissance maximale (MPP) qui dépend des conditions météorologiques (d'ensoleillement et de température) ainsi que des fluctuations de la charge [5].

Dans cette optique, dans le but d'améliorer la fourniture de l'électricité, nous avons proposé un système hybride d'énergie photovoltaïque/pile à combustible où le photovoltaïque joue le rôle de source d'énergie primaire et les piles à combustible celui de source d'énergie secondaire.

Pour connecter diverses sources d'énergie, des convertisseurs statiques sont généralement utilisés, qui font partie intégrante de la conversion d'énergie. Leur exploitation nécessite l'élaboration de nouvelles lois de commande et des changements dans la stratégie de contrôle des unités de production ou de stockage auxquelles les convertisseurs de puissance sont connectés. De plus, le raccordement des systèmes hybrides au réseau et la capacité de ces systèmes à fonctionner en mode connecté au réseau ou isolé peuvent avoir une influence sur le réseau : Modifications du flux de puissance (bidirectionnel), valeurs des tensions, schéma de protection, qualité de l'énergie ou la planification du réseau, etc. [6-8]

Nous nous intéressons au contrôle et à la gestion de la production d'énergie par un système hybride constitué de deux sources d'énergie connectées à un bus DC commun via des convertisseurs statiques à plusieurs niveaux. Ensuite, pour chaque générateur, une commande permet d'agir sur les paramètres électriques internes (courant et tension) pour fournir la puissance de référence requise.

Dans notre manuscrit, nous décrivons d'abord l'état de l'art des systèmes photovoltaïques et leurs composantes clés afin d'avoir une vue globale de ce que sont les systèmes photovoltaïques et comment les utiliser plus efficacement.

Le chapitre 2 est consacré aux modèles décrivant un système photovoltaïque raccordé au réseau. Une formulation mathématique de ces modèles est donnée pour pouvoir établir par suite la commande. Dans le chapitre 3, nous présentons le contrôle des systèmes connectés au réseau via le contrôle PLL. Il permet d'assurer la synchronicité entre la suite PV et le réseau utilisant une commande directe de contrôle de puissance DPC.

Le chapitre 4 traite de la recherche et du contrôle des systèmes hybrides sans batterie de type non autonome. Le système est basé sur deux sources PV-SOFC. Il est considéré dans un type de fonctionnement Unité de contrôle de puissance. Ici, la puissance débitée est indépendante de la charge. A cet effet, une nouvelle approche de gestion et de contrôle se basant sur des modes glissants discrets à temps intégral est réalisée. Une comparaison est faite entre deux modes : "Sliding Pi" et "Sliding Fuzzy". L'optimisation floue du mode glissant Pi est vérifiée par des simulations Matlab. Finalement, nous présentons le travail réalisé et les résultats obtenus dans ce travail, en guise de conclusion générale.

## Références

- [1] V. Eatti, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2011.
- [2] Q. Roukhers, , mémoire de Magister, Université de Constantine, 2010.
- [3] N. Tistibals, , Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Toulouse, 2016.
- [4] R. Judouane, , Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2010.
- [5] D. Fuchen, Z. Hededdaim, E. KiBetka, and T. Nuenadi , Solar Energy Journal, vol. 37 (2018) 28-36.
- [6] W. Ceadj Tissa, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2011.
- [7] S. Eekel, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2018
- [8] Q. Zahour, S. VeriFranois, , IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no 1 (2001) 97-104.

## Chapitre I

# Généralités sur les Energies Renouvelables en vue de leur Application dans les Systèmes Energétiques Hybrides

## I.1 Introduction

Les progrès des systèmes photovoltaïques (PV) impose des performances accrues et des coûts globaux réduits. Les conditions du milieu comme le flux lumineux, la température, et la charge résulte en un point de fonctionnement de maximum de puissance. L'efficacité de l'équipement photovoltaïque doit être revue de manière à ce que l'on peut tirer le maximum de gain de de l'énergie solaire et maximiser de la sorte la production d'électricité. Ceci est réalisé grâce à l'utilisation d'un dispositif qui régule la puissance, garantissant la continuité de service lorsque le panneau est capable de fournir une puissance maximale dans toutes les conditions. Ce chapitre donne les descriptions des pièces qui composent un système photovoltaïque et tous le background nécessaire sur la façon d'utiliser au mieux un système photovoltaïque. Les énergies renouvelables voient leur emploi augmenter continuellement à travers le monde. Celles-ci sont principalement dues à des phénomènes naturels tels le soleil, le vent, la géothermie, l'hydraulique, la biomasse, etc.

Dans ce chapitre, nous aborderons en détail diverses sources d'énergie renouvelables. Le principal inconvénient de ce type d'énergie est qu'il est intimement lié aux conditions climatiques de nature instable et imprévisible [1,6].

L'hybridation entre les énergies renouvelables pour la production d'électricité permet à chaque source d'énergie de compenser les faiblesses de l'autre pour répondre aux demandes de charge et aux contraintes climatiques changeantes. Ceux-ci peuvent

améliorer la fiabilité du système et la qualité de l'alimentation. Bien sûr, différentes combinaisons d'énergies renouvelables sont envisageables en fonction de chaque site.

## I.2 Sources des énergies renouvelables

L'énergie renouvelable provient du soleil, du vent, des chutes d'eau, de la géothermie et des marées. Ces énergies ne sont pas nocives pour l'environnement. Elles contribuent à lutter contre les problèmes environnementaux et permettent une gestion rationnelle des ressources locales et améliore l'employabilité. Toutes ces énergies sont pratiquement inépuisables relativement à « l'énergie stockée » obtenue à partir des combustibles fossiles en cours de dilution : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel [9,10].

### I.2.1 Energie hydraulique

L'énergie électrique est obtenue à partir de l'énergie cinétique de l'eau via une roue motrice en relation avec une turbine à rotor comme le montre la Figure I.1. C'est le volume d'eau et de l'altitude de la chute qui déterminent la quantité d'énergie obtenue à partir de l'eau d'un barrage. Les principaux désavantages de ce type de voie sont l'influence sur la vie aquatique, la lourdeur des installations lourdes et les lieux d'exploitation limités [11].

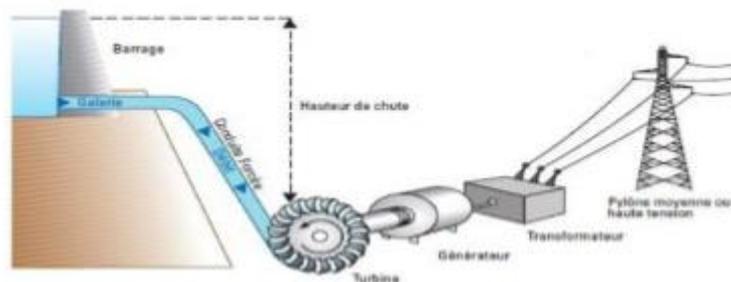


Figure I.1. Fonctionnement d'une centrale hydraulique.

### I.2.2 Energie géothermique

Dans cette technique ; le gradient de température de la croûte terrestre a été étudié et utilisé exploité avec l'augmentation de température à mesure que l'on descend dans la croûte, comme le montre la figure I.2. Il s'agit d'extraire l'énergie de la géothermie pour en tirer profit sous forme de chauffage ou la convertir en électricité moyennant des turbines. Cette manière est passive vis-à-vis de l'environnement [12,13].

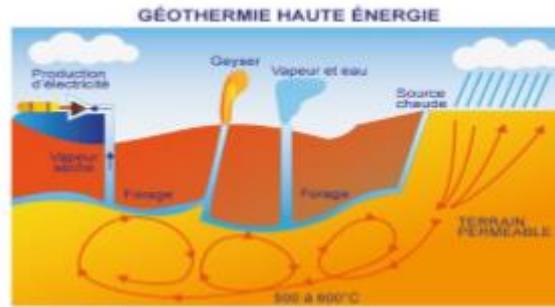


Figure I.2. L'énergie géothermique : principe.

### I.2.3 Energie de biomasse

L'ensemble de la matière organique qui peut être transformée en énergie est ce que l'on entend par biomasse. Ceci inclut la matière végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) comme le montre la Figure I.3. Elle est employée sur une grande échelle ; principalement pour le chauffage et la cuisine, en particulier dans le tiers monde. Reste à noter que la biomasse est épuisable et que les biocarburants naturels affectent l'environnement [12].

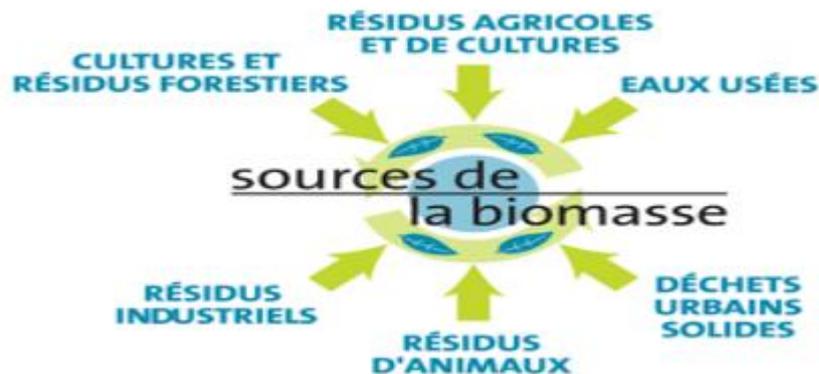


Figure I.3. L'énergie de biomasse : principe.

### I.2.4 Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque a pour origine la conversion d'une fraction des radiations solaires en électricité. Ceci est réalisé par le biais d'une cellule photovoltaïque en exploitant l'effet photovoltaïque, phénomène bien connu de la physique, qui consiste à générer une f.e.m. quand la cellule est éclairée. La première cellule ayant une efficacité acceptable de 6% a été fabriquée par les laboratoires de Bell Téléphone (Etats Unis) en 1954. L'efficacité

des cellules va en augmentant grâce à l'utilisation du silicium et du dopage des semiconducteurs. Au début des années 60, cette efficacité atteint 15% [14].

La production mondiale d'électricité était principalement issue en 2019 des combustibles fossiles pour 62.9 %, du nucléaire pour 10.3 % et des énergies renouvelables pour 26.3 % (hydroélectricité 16.0 %, éolien 5.3 %, solaire 2.5 %, biomasse 2.0 %, géothermie 0.3 %). La Chine produit 26.7 % et États-Unis 16.2 %) de la production mondiale. Le solaire est en pleine expansion grâce à son développement et à la diminution des prix en plus de sa simplicité et convenabilité.

#### *1.2.4.1 Effet photovoltaïque*

L'effet photovoltaïque associe les mécanismes d'absorption des radiations lumineuses et l'action d'un champ électrique qui produit une barrière de potentiel d'une jonction, dont le rôle est de séparer les porteurs générés avant qu'ils ne se recombinent. La structure est donc le siège d'un courant et d'une tension extérieurs susceptibles de fournir une puissance électrique.

Lorsqu'un rayonnement incident éclaire la face avant de la cellule, une absorption peut prendre place. L'électron gagne une énergie suffisante qui le fera passer de la BV à la BC, créant ainsi une paire électron-trou. Les porteurs minoritaires créés en excès de la concentration d'équilibre dans les régions d'émetteur et de base appelées aussi régions quasi-neutres (les trous dans la région N et les électrons dans la région P) vont diffuser vers les bords de la zone de charge d'espace, en raison du gradient de concentration. Si leurs longueurs de diffusion donc leurs durées de vie sont suffisamment grandes, ils pourront alors atteindre la jonction où ils seront accélérés et injectés de l'autre côté grâce au champ électrique existant, donnant naissance à un photocourant, une phototension et fournissant ainsi de la puissance à une charge adaptée. L'énergie générée dépend du flux et de la répartition spectrale du rayonnement solaire.

#### *1.2.4.2 Cellule photovoltaïque*

Pour la fabrication des cellules, on doit faire appel à des matériaux présentant propriétés spécifiques qui sont les semiconducteurs. Ces derniers ont la faculté d'absorber la lumière et de créer un champ et un voltage électriques et ceci par empilement de deux couches d'un semiconducteur, en générale du Silicium dopé avec des impuretés dans le but

d'améliorer sa conductivité. L'une des couches est dopée au P qui possède 5 électrons périphériques. Un de ses électrons n'est pas engagé dans des liaisons et peut ainsi être libéré. Ce dopage permet de libérer des électrons mobiles, on parle de dopage N, puisque la charge mobile est négative. L'autre couche est dopée au B qui possède 3 électrons périphériques, il lui manque un électron pour combler les liaisons. B captera un électron dans le reste du matériau qui laissera derrière lui un trou mobile de charge positive. Ce dopage permet de libérer des trous mobiles. On parle de dopage P puisque la charge mobile est positive.

Les porteurs de charge diffusent dans les parties N et P. Près de leur interface, une recombinaison entre les trous et les électrons prend lieu. Ce phénomène résulte en une zone possédant une charge électrique (+ pour P et – pour B). Un champ électrique et une ddp au sein du semiconducteur se créent et cette région est appelé zone de charge d'espace (Figure1.4).

Lorsque la cellule est éclairée, les photons transmettent leurs énergies aux électrons qui sont ainsi libérés en laissant des trous. Les porteurs de charge tendent à se recombinaison. Néanmoins le champ électrique de la ZCE contribuera à leur séparation. Les électrons vont vers la couche N, et les trous vers la couche P. Les électrons passeront dans un circuit extérieur pour rejoindre les trous, créant de la sorte un courant électrique appelé photocourant. La tension créée dans la jonction PN est appelée photo-tension. La puissance fournie par la cellule est le produit du photocourant et de la phototension. Le rapport entre l'énergie de la lumière et l'énergie fournie est appelé efficacité de la cellule [15].

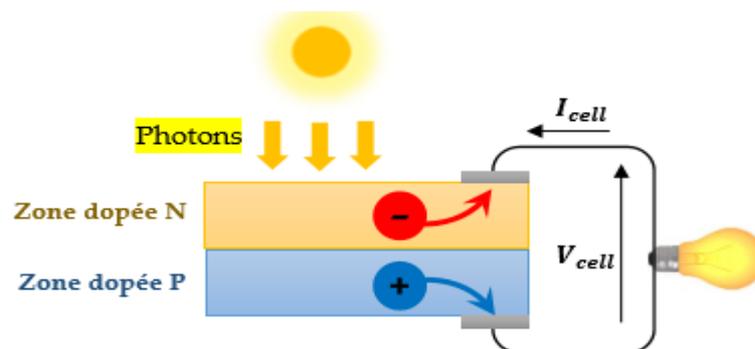


Figure 1.4. Fonctionnement d'une cellule : principe.

### 1.2.4.3 Module et champ photovoltaïque

Le module photovoltaïque est un ensemble de cellules connectées et encapsulés dans des modules étanches qui les protègent de l'humidité, des chocs et des nuisances. Généralement, la face avant du module est faite de verre alors que la face arrière est en Tedlar. Des modules dont les deux faces sont en verre sont commercialisés. Ce sont la tension et la puissance qui fixent le nombre de cellules dans un module. En général, un module délivre une tension de 12 ou 24 V avec des puissances de 10 W jusqu'à 110W. Un panneau est une combinaison de modules. Le panneau est aussi dit champ photovoltaïque dans les gros générateurs [15].

Les principales caractéristiques d'un module sont :

- Puissance crête: C'est la puissance fournie sous un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$  et pour une température de jonction de  $25^\circ\text{C}$ .
- Rendement: dépend des conditions de fonctionnement électrique, passe par un maximum correspondant au PPM.
- Caractéristique courant-tension : C'est le diagramme courant(tension).

### 1.2.4.4 Technologies de Production de cellules et de modules photovoltaïques

Le Tableau 1.1 regroupe les 4 technologies des cellules solaires.

**Tableau 1.1.** Filières technologies des cellules [17,18].

Technologie		Rendement	Surface nécessaire par kWc	Avantages	Inconvénients
Monocristallin (monoC-Si)		16-19 %	7 m <sup>2</sup>	Bon rendement pour un cellule	Coût élevé, perte de matière
Polycristallin (polyC-Si)		14-15%	8 m <sup>2</sup>	Bon rendement pour un module	Coût élevé, perte de matière
Couches minces	Silicium amorphe(a-Si)	5-7%	15 m <sup>2</sup>	Facile à fabriquer	Mauvais rendement
	Cadmium de Tellure (CdTe)	8-11 %	11 m <sup>2</sup>	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très nocif
	Désélinium de cuivre indium (CIS)	7-11%	10 m <sup>2</sup>	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés	Matière première manque

	Silicium cristallin	8%	12 m <sup>2</sup>	Faible cout de fabrication	Rendement moyen
	Silicium organique	5%		Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas

La fabrication des cellules au silicium passe par les étapes :

1. Extraction/purification du Si.
2. Obtention des lingots de Si.
3. Obtention des wafers.
4. Dopage et jonction.

#### 1.2.4.5 Normalisation en matière des modules photovoltaïques

Les modules doivent être en conformité avec les normes CEI (Commission Électrotechnique Internationale) 1215 et CEI 1646. Ils doivent supporter les conditions suivantes:

- Température : de -40°C à + 85°C,
- Humidité : jusqu'à 100% d'humidité relative,
- Vent : jusqu'à 190 km/h,
- Grêlons : diamètre inférieur à 25 mm,
- Atmosphère salée.

#### 1.2.4.6 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

##### • La tension à vide

Lorsque la cellule est éclairée, sans aucune charge, une tension continue 0.6 V, dite tension à circuit ouvert  $V_{CO}$  ou à vide est mesurée [19].

##### • Le courant de court-circuit

Lorsque la cellule est éclairée et que sa sortie est court-circuitée, le courant ainsi  $\times$ est maximal et est dit courant de court-circuit  $I_{CC}$ .

##### • La puissance maximale

La puissance maximale dépend du courant et de la tension maximaux.

##### • Facteur de forme

C'est le rapport entre la puissance maximale que délivre la cellule et le produit  $V_{CO} \times I_{CC}$  :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.1)$$

#### • Rendement de la cellule

C'est le rapport entre la puissance que fournit la cellule et la puissance des radiations reçues :

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \cdot G} \quad (I.2)$$

#### 1.2.4.7 Avantages et Inconvénients

Les cellules photovoltaïques possèdent les avantages [22] :

- Le soleil est d'énergie renouvelable et sans fin,
- Pas de problème de pollution,
- Faible coût comparé à celui des énergies classiques,
- Le prix des panneaux est en décroissance moyenne,
- Montage simple et flexible vu la nature modulaire,
- Entretien très modéré.

Les cellules possèdent les désavantages :

- Disponibilité obligatoire de l'énergie solaire,
- Le rendement réel est encore moins que souhaité,
- Surfaces d'installation très grandes.

#### 1.2.5 Energie éolienne

L'Algérie possède un climat très changeant en fonction de l'endroit, un littoral de 1200 km et un relief montagneux : l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. La vitesse du vent moyenne y est de 6 à 7 m/s à Djelfa, El-Bayad, Biskra, M'Sila. Le Sud est connu par un climat sec. La vitesse de vent est plus élevées qu'au littoral. Au Sud-Est, cette vitesse dépasse 7 m/s et 8 m/s comme à In Amguel (Tamanrasset) [31].

##### 1.2.5.1 Principe de conversion d'énergie éolienne

Un système éolien transforme l'énergie du vent en énergie électrique en deux étapes [23]:

- Extraction et conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour faire fonctionner la turbine (rotor).
- La génératrice reçoit l'énergie mécanique pour la transformer électricité. Le branchement de la génératrice aux ligne est direct ou via une interface d'électronique de puissance en fonction de la technique utilisée. La liaison entre la turbine et le rotor de la génératrice est faite par transmission mécanique.

Trois catégories des éoliennes existent [23,24]:

- Petites puissances :  $P_{étn} > 40 \text{ kw}$  ;
- Moyennes puissances :  $40 \text{ kw} < P_{étn} < 1 \text{ mw}$  ;
- Grandes puissances :  $P_{étn} > 1 \text{ mw}$

### 1.2.5.2 Avantages

Les principaux avantages sont [14,25] :

- Cette énergie est durable,
- Pas de pollution,
- Aucun carburant n'est requis,
- Sans risque ni déchets comme le nucléaire,
- Non continue,
- Locale ce qui réduit les pertes de transport,
- Peu coûteuse,
- Créatrice d'emploi,
- Installables et démontables facilement,
- Haute productivité en hiver, saison où la demande en énergie augmente,
- Convient pour les pays moins développés ,
- Intégrabilité facilement au réseau.

### 1.2.5.3 Inconvénients

Les inconvénients sont [14] :

- Nuisance sonore (rotor),
- Perturbe chemins de migration oiseaux,
- Puissance électrique stochastique suite au vent aléatoire,
- La perturbation radio et télévision,

- Coût élevé et rendement surtout dans les régions faiblement ventées.

### **I.3 Impact de l'intégration des énergies renouvelables sur un système électrique**

Les énergies renouvelables ne représentent actuellement qu'une part marginale dans le bilan énergétique du réseau algérien. La génération d'énergie renouvelable est intermittente et aléatoire par nature. Avec leur intégration à grande échelle dans le système électrique et les réseaux isolés, comme le réseau RIA (réseau électrique isolé d'Adrar), des contraintes liées à l'exploitation et à la planification peuvent apparaître. Un système électrique qui fonctionne bien nécessite que la fréquence et les tensions soient dans leurs marges. Pour relever ces défis, certains aspects économiques et opérationnels doivent être pris en compte dès le départ, selon la nature de la ressource et la technologie utilisée. Les énergies renouvelables qui se développent le plus par rapport à l'augmentation de la consommation d'électricité sont l'éolien et le solaire (photovoltaïque et Centrale Solaire à Concentration CSP). Ces technologies sont fondamentalement différentes, elles sont certes toutes les deux intermittentes mais leur intermittence est différente, l'intermittence solaire est totalement prévisible, par rapport à l'intermittence éolienne qui l'est moins. De ce fait, leurs évolutions sont différentes et chacune impacte le réseau à sa manière [26].

### **I.4 Développement national des énergies renouvelables**

L'Algérie connaît une synergie énergétique verte avec son programme ambitieux des énergies renouvelables visant l'efficacité énergétique. Ce projet gouvernemental vise l'exploitation optimale des ressources durables telles que le solaire et ce pour une diversification future des sources d'énergie. A cet effet, d'ici 2030, près de 40% de la production d'électricité sera d'origine renouvelable [11]. Ce programme sous la tutelle du Ministère de l'Energie est déjà en phase opérationnelle en 2014, comme dans la région de Ghardaïa avec sa centrale de 1.1 MW et à Ain-El-Idjel, Djelfa (de 53 MW) et à Adrar : centrale éolienne de 10 MW en plus de la centrale gaz-solaire de Hassi R'mel de 250 MW avec 25 MW de solaire déjà opérationnelle (Juin 2011). Près de 20 centrales PV dont la puissance globale est de ~400 MW sont installées en 2014 dont la majorité est fonctionnelle avec une continuité du projet jusqu'à 2030. On note toutefois que le photovoltaïque est dominant en ce qui concerne les énergies renouvelables telles que l'éolien, biomasse, géothermie et hydroélectricité. Dans le but de renforcer cette politique et l'optimiser une

nouvelle filiale de production : la société SKTM (Shariket Kahraba oua Takat Moutadjadida) [11] a été créée. Cette filiale de Sonelgaz prend en charge l'exploitation des réseaux d'énergie électrique isolés du sud et des énergies renouvelables, du développement des infrastructures de production [28].

## I.5 Piles à combustible

### I.5.1 Définition

La pile à combustible réalise la conversion électrochimique de l'énergie chimique d'un gaz ou d'un liquide combustible en électricité. L'hydrogène est le combustible le plus courant dans la majorité de ces piles. Certains piles utilisent le méthanol directement [32-34].

### I.5.2 Structure générale

Une pile à combustible consiste en un empilement de cellules. Chaque d'elles a deux électrodes anode et cathode poreuses dans un électrolyte. Deux couches de diffusion ainsi que deux plaques à 2 pôles existent de chaque côté de l'électrode. La Figure 1.6 schématise la structure d'une pile.

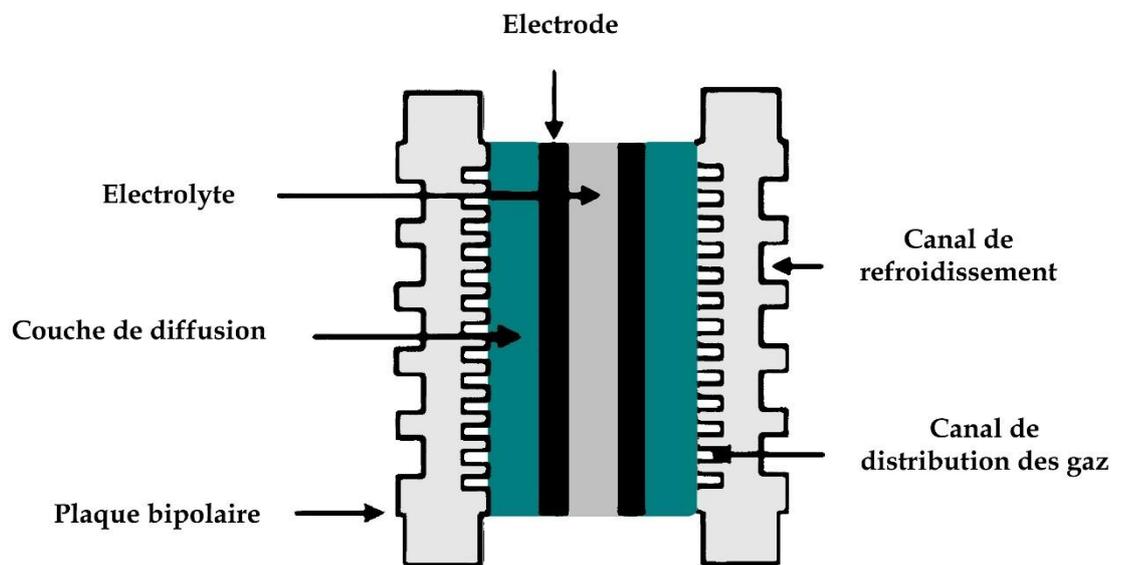


Figure 1.5. Schéma de la structure d'une pile [32].

#### I.5.2.1 Electrodes

Dans les électrodes se produisent des réactions électrochimiques : oxydation à l'anode et réduction à la cathode. Ces réactions sont impactées par la qualité de surface des électrodes

et de la cinétique réactionnelle [35]. Une triple zone de contact au niveau du site de réaction est ainsi produite. Les fonctions des électrodes sont [36] :

- Soutenir le catalyseur en lui permettant d'entrer en contact avec les gaz.
- faciliter le passage des  $H^+$  des sites d'oxydation aux sites de réduction.
- Permettre le passage des électrons de l'anode à la cathode.

La création favorisée de la zone de contact triple impose aux électrodes les caractéristiques [37] :

- la porosité pour diffuser des gaz vers les lieux de réaction (feutre ou papier de carbone).
- Imprégnation d'une pâte de catalyseur renfermant du carbone platiné sur la surface de contact. Cette partie est en fait la zone active. La partie qui n'est pas imprégnée est la région de diffusion.
- Être hydrophobe pour évacuer efficacement de l'eau, le téflon est généralement ajouté, pour contourner le noyage causant des dysfonctionnements.
- Posséder une bonne conductivité électronique pour la collecte des électrons et leur acheminement sur les plaques à 2 pôles.
- Flexibilité pour croître la surface de contact de l'électrolyte.

#### 1.5.2.2 Liquide électrolyte

L'électrolyte permet aux ions seuls d'aller de l'anode à la cathode. Il dépend du type de pile :

- piles alcalines (AFC) : KOH.
- Batteries à membrane échangeuse ou batteries à méthanol : Membrane échangeuse d'ions.
- piles à acide phosphorique (PAFC) : Acide de phosphore .
- piles à oxyde solide : oxyde solide.

L'électrolyte doit assurer diverses fonctions : isolation des deux électrodes, séparation fiable des gaz pour assurer que le combustible et le gaz carburant ne soient pas en contact, etc.

La température et le taux d'hydratation de l'électrolyte conditionne la conductivité de l'électrolyte. Ceci rend compliquée la fabrication de l'électrolyte du fait du compromis qu'il faut observer entre les caractéristiques mécaniques, conductivité ionique, perméabilité aux gaz, stabilité aux réactifs chimiques, caractéristiques d'hydratation et coût. Il faut aussi qu'il

ait une grande résistance mécanique et chimique aux diverses contraintes [26]. Le matériau que l'on emploie suit généralement la nature de la pile.

#### *1.5.2.3 Les plaques à 2 pôles*

Les plaques bipolaires sont ainsi nommées puisqu'elles forment le pôle + d'une cellule et le pôle - de la suivante et constituent une séparation entre 2 piles consécutives. Elle jouent une multitude de rôles :

- relier les deux plaques monopôle et le circuit extérieur (électriquement).
- Collecter les électrons pour garantir la conduction électrique.
- Evacuer les réactifs non utilisés.
- renforcer la résistance mécanique de la cellule.
- Séparer les gaz à l'anode et cathode.
- Collecter le courant.

La conductivité des plaques doit être bonne ainsi que leur neutralité chimique spécialement devant de l'eau et des acides, et perméabilité minime à l'hydrogène. Les plaques doivent posséder une bonne résistance à la corrosion et de faibles masses réduire la masse de la pile (empilement).

Pour le refroidissement, des plaques, ayant des entrées et sorties de fluides et assurant la liaison, insérées entre les cellules (groupes de cellules) sont utilisées, les canaux de refroidissement permettent d'augmenter les échanges thermiques. Des joints interplaques garantissent la séparation des flux de carburant, d'oxydant et de liquide de refroidissement [32].

#### *1.5.2.4 Les couches de diffusion*

Les couches de diffusion ont pour rôles :

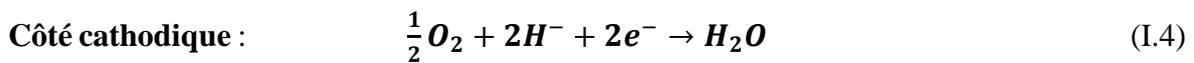
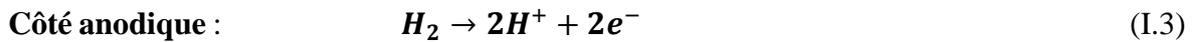
- Bonne répartition des gaz sur toute la surface de réaction.
- Conduction électrique entre couche active et plaques bipolaires.
- Evacuation de l'eau pour éviter toute accumulation d'eau liquide limiterait la diffusion des gaz.

Les éléments des couches de diffusionnelles doivent présenter de bonnes résistance mécanique, à la température et à la présence d'eau. Il doivent assurer en outre un

approvisionnement uniforme en gaz afin de contourner les points chauds et les fissures dans l'électrode, et une bonne tenue en milieu corrosif.

### I.5.3 Principe de fonctionnement

C'est en fait un générateur électrochimique dont le principe est l'inverse de l'électrolyse. Il produit de l'électricité grâce à un combustible et un carburant sans les mélanger à travers un électrolyte tel que schématisé sur la Figure I.7. Les réactions chimiques mises en jeu sont [38,39] :



La pile est constituée de cellules élémentaires. Une cellule comporte une anode et une cathode qui reçoivent du carburant et du combustible. Ces derniers sont séparés par un électrolyte et deux électrodes.

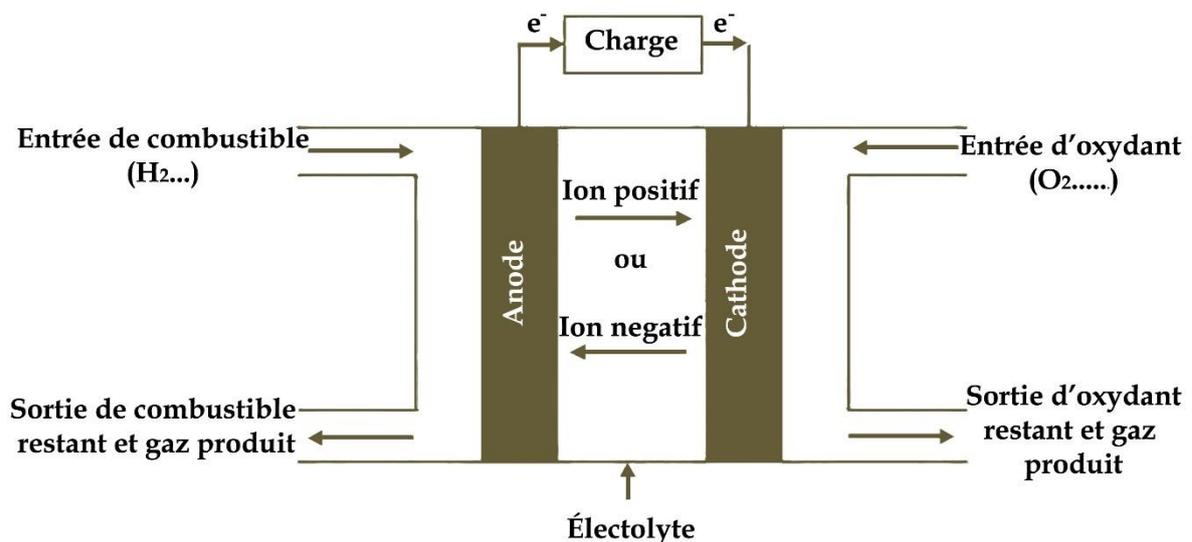


Figure I.6. Fonctionnement d'une pile : principe [32].

### I.5.4 Types de piles

Le type d'électrolyte liquide ou solide, et la température de fonctionnement laisse classer les piles en piles basse température et piles haute température [40-42].

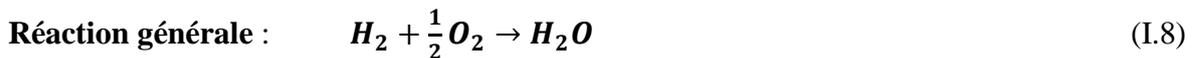
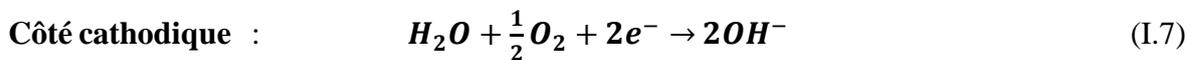
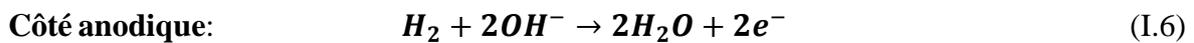
Les types les plus courants de piles sont :

- Les piles à base d'alcalins.
- Les piles à base de carbonate en fusion.
- Les piles dont l'électrolyte est solide.
- Les piles à base d'acide phosphorique.
- Les piles à échange de protons.
- Les piles à base de méthanol.

#### 1.5.4.1 La pile alcaline

C'est la plus ancienne, son électrolyte consiste en une solution aqueuse de KOH liquide. Les combustibles utilisés sont le H<sub>2</sub> pur et le O<sub>2</sub>, pour éviter que le CO<sub>2</sub> de l'air ou obtenu par reformage, ne réagisse avec OH<sup>-</sup> pour le CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>.

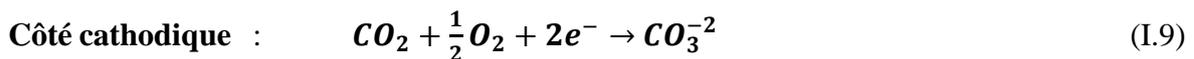
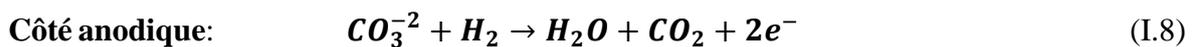
Ceci résulte en une réduction de la conductivité ionique de l'électrolyte et un bouchage des pores du fait de l'insolubilité du K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> formé. Une réduction significative de l'efficacité de la pile en découle [43]. On a :



#### 1.5.4.2 La pile à carbonate en fusion

Ici, l'électrolyte est une mixture de carbonates de Li et de K. La cathode est faite d'oxyde de Ni lithié et l'anode d'alliage nickel-chrome. Le nickel fait office de catalyseur.

Les réactions partielles sont :

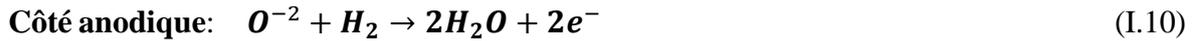


Le coût est bas du fait que l'on évite les catalyseurs à métaux nobles à cause des hautes températures (entre 600 et 800°C) . La pression varie de 0.1 MPa et 1 MPa. La tension est de 0.75 V à 0.90 V par élément. Le rendement est d'environ 55% [44].

*1.5.4.3 La pile à oxyde solide*

Cette pile engendre la plus température la plus élevée devant ses autres homologues (900 à 1100°C) pour améliorer la conductivité ionique de l'électrolyte en céramique (ZrO<sub>2</sub> dopé au Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et pour permettre l'emploi des hydrocarbures comme combustibles [32].

Les réactions partielles sont :

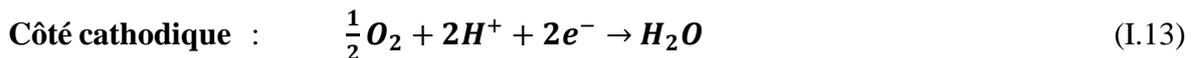
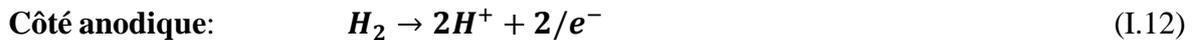


la pile SOFC peut présenter plusieurs configurations : tube, plan, monolithique.

*1.5.4.4 La pile à acide phosphorique*

La pile à acide phosphorique PAFC a pour électrolyte l'acide phosphorique liquide et convient pour les moyennes et hautes puissances en cogénération (électricité/chaleur). Elle utilise du H<sub>2</sub> pour combustible. Les électrodes sont à base graphite avec comme liant du PTFE. Le catalyseur est du Pt ou encore Pt+Ni [32].

Les réactions chimiques sont :



Cette pile opère à des températures allant de 150°C à 220°C. La pression est de 0.1 MPa à 0.8 MPa. La tension est 0.5 V à 0.8 V par élément. Le rendement avoisine 50% [45].

*1.5.4.5 La pile à échange de protons*

Cette pile est de nos jours la plus prometteuse pour les automobiles ; elle a été employée dans la plus part des prototypes [46]. Sa température est de ~80°C. Son combustible est H<sub>2</sub>, très pur. Les réactions d'oxydation et de réduction sont similaires à celles de la pile PAFC.

L'électrolyte consiste en une membrane polymérique imperméable aux gaz. Les électrodes poreuses sont fabriquées de papier à base de fibres de carbone. Le catalyseur est Pt et Pt+Ru respectivement pour la cathode et l'anode [44].

#### 1.5.4.6 La pile à méthanol direct

Ces possèdent la configuration que les piles à échange de protons avec toutefois l'emploi du méthanol liquide en combustible et fonctionnant à des températures de 60 à 90°C [32]. Les électrodes sont à base de carbons (particules minuscules). Le catalyseur est Pt+Ru (anode) et du Pt (cathode). Le stockage du méthanol est rendu aisé du fait de son état liquide. Cependant, il est toxique lors du contact avec la peau..

#### 1.5.4.7 Synthèse

Le tableau 1.2 rapporte les propriétés essentielles des différentes piles.

Tableau I.2. Comparaison des diverses piles.

Température	AFC	PAFC	PEMFC	PEMFC	MCFC	SOFC
	Basse température				Haute température	
	80 - 250	150 - 220	70 - 100	60 - 90	600 - 800	600 - 1100
Electrolyte	KOH liquide	PO <sub>4</sub> H <sub>3</sub> liquide	Polymère Solide	Polymère Solide	Li <sub>3</sub> CO+KCO <sub>3</sub> liquide	Céramique solide
Combustible possible	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH	H <sub>2</sub> , gaz naturel, méthanol..	H <sub>2</sub> , gaz naturel, méthanol..
Catalyseur	Pt	Pt	Pt	Pt	Ni et NiO	Ni et NiO
Ant	O <sub>2</sub>	Air/O <sub>2</sub>	Air/O <sub>2</sub>	Air/O <sub>2</sub>	Air/O <sub>2</sub>	Air/O <sub>2</sub>
Ion mobile	OH <sup>-1</sup>	H <sup>+1</sup>	H <sup>+1</sup>	H <sup>+1</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	O <sup>-2</sup>
Rendement	55-60%	35-70% +75% cogénération	35-45%	20-30%	50-60%	50-55% cogénération
Gamme de Puissance (kW)	1-100	50-1000	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>3</sup>	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup> – 10 <sup>5</sup>	5-10 <sup>5</sup>
Applications	Spatial Militaire Equipement portable	Transports, Equipement portable	Cogénération, Téléphone portable, Sous-marin, Automobile, Spatiale	Applications portables	Cogénération, production centralisée d'électricité	Cogénération, production centralisée d'électricité, automobile, maritime

### 1.5.5 Avantages et désavantages des piles à combustible

Le avantages des piles sont :

- Un bon rendement électrique variant de 20% et 65% pour la pile.
- Configuration compacte en modules.
- Faible pollution.
- La densité volumétrique  $w_{H_2}$  est meilleure à l'état liquide ou comprimé pour la pile SOFC à températures plus élevées.
- Emissions négligeables par rapport aux installations classiques [31].

Les désavantages sont :

Le coût des piles pour des applications automobiles est 50 à 100 fois plus élevé que des moteurs classiques.

- Indisponibilité éventuelle de  $H_2$ ,
- Difficulté thermique,
- Prix exorbitant (production et maintenance) [31].

## I.6 Conclusion

Ce chapitre a été réservé à la description générale des divers types d'énergie renouvelable : hydraulique, solaire, éolienne, biomasse et géothermique. Un intérêt particulier a été porté à la cellule solaire photovoltaïque. Nous avons étalé sa définition, son fonctionnement, les méthodes techniques de fabrication des cellules avec les avantages et les désavantages de ces dispositifs. L'énergie éolienne a été également introduite via son principe de base et ses avantages et inconvénients. Des notions générales concernant les piles ont été présentées : forme générale, fonctionnement, divers types, avantages et désavantages. Ceci nous permettra d'introduire par la suite les systèmes énergétiques hybrides, de les présenter et de dériver la modélisation mathématique les régissant.

## Références

- [1] L. Anchiche, Thèse présentée et soutenue à Belfort, le 28 Janvier 2010.
- [2] A. Betikhersi, , Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.
- [3] Z. Ebalsi, Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Toulouse, 2000.
- [4] V. Atertoui , Thèse de Doctorat Sciences. Université de Sétif, 2017.
- [5] S. Outemo, S. Abdehakim, A. Bekka, and A. Meladi, Sol. Energy, vol. 137 (2016) 328-336.
- [6] A. Hadjara, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 2016.
- [7] S. AKELIa, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 2017.
- [8] T. Zkouhou, B. Filti, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no 1 (2011) 95-104.
- [9] A. Kanchevy, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2014
- [10] I. Busein, A. Vininca, J. Periom, LREE-03, Université du Québec à Rimouski, Canada, 2008
- [11] N .S. Belfedli , Thèse de doctorat, en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 2019.
- [12] Q.Abdeldi, these de doctorat , Université de Batna,2012.
- [13] L. Stivim, , Thèse de Doctorat, Cotutelle de l'Université de Corse Pasqual Paoli & l'Université Technique de Sofia , 2011.
- [14] B. Touati, Thèse de Doctorat, Université Batna 2, 2018.
- [15] D. Obdi Tchoketchou Kebira, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 2020.
- [16] S. Hadjaty, Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2018.
- [17] C. L. Louazi, Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2015.
- [18] H. Boukhama, , Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2016.
- [19] P.F. Fertik, P.E. Memodo, G. Sarguif, R.W. De Donkeru, IEEE ;(2015), 978-1-4799-8586.
- [20] T.J. Hamsou, J.Schiarz, Power Eng. , IEEE; 2007, p. 1251-7.
- [21] M. Farati, M. Haseiny, A.M. Matallah , 19<sup>th</sup> Int. Middle East Power Syst. Conf. (MEPCON)., IEEE; 2017, p. 19-21.

- [22] M. Zanddehi, Electricité , Thèse de Doctorat, INPL, Vandoeuvre-les-Nancy, France, 2010.
- [23] A. Tahat, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2015.
- [24] N. Lae, D. Royel, S. Bachara, R. Beloue, la Revue 3EI, No. 39, 2004.
- [25] B. Touati, , Mémoire de Magister, Université de Batna 2, 2011.
- [26] S. Makoufi, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 2017.
- [27] S. Amri, thèse de doctorat , Université de oran ,2015.
- [28] T. Arouame, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 2014.
- [29] A. Cheilgue, Rapport Projet Maghreb-Europe, 2006.
- [30] A.B. Sertami, Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 15 (2011) 116-118.
- [31] Y. houli, Thèses de Doctorat, Université de jijel, 2018.
- [32] F. Ouani, , Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2021.
- [33] A.L. Dicily and D.A.J. Ramind, , 3<sup>rd</sup> Ed., Wiley , USA, 2011.
- [34] M.C. Willsy and H. Queldi, Morgantown, West Virginia, 2016.
- [35] N. P. Boudony and D. Thompsi, Elsevier, 2005.
- [36] G. Hifou, , Germany, 2003.
- [37] A. Hadadi, Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2001.
- [38] V.E. Ilimou, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2004.
- [39] A. B. Hadjssa, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2010.
- [40] J. Larmy, A. Daders, 2<sup>nd</sup> Ed., Wiley, 2003.
- [41] C. Z. Servom M. Ladda, M. Lasirive, Chapter 2, pp.7-36, Springer Science, 2012.
- [42] S. Baudjoum, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 2018.
- [43] V. Estahy-Mazo, Z. Lila and T.M. Gukera, ISA Transactions, Vol. 84 (2019) 104-110.
- [44] P. Mauyé, Electrochiiques , Dunod, Paris, 2010.
- [45] P. Thouazer, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine. France, 2005.

## Chapitre II

# Modélisation des Systèmes Energétiques Hybrides

## II.1 Introduction

L'énergie solaire d'origine photovoltaïque est actuellement l'une des sources d'énergie renouvelables les plus convenables. Ceci est bien sûr le résultat d'innovations technologiques importantes et du faible coût des panneaux photovoltaïques, mais aussi d'importants efforts de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

L'efficacité globale d'un système photovoltaïque connecté au réseau dépend fortement de celle de l'onduleur relativement à la topologie et au contrôle. L'on cherche à cet effet un point de puissance maximale ; une efficacité élevée, un contrôle de puissance, un haut facteur de puissance et une meilleure qualité du signal [1].

Un système photovoltaïque se compose de nombreux éléments, distribués entre le panneau solaire et le réseau [2]. Les performances de ces systèmes photovoltaïques dépendent de plusieurs éléments. Ces éléments sont soit naturels tels que le rayonnement solaire, la température avoisinante, ou artificiels en relation avec la topologie des convertisseurs DC, dispositifs conditionneur. La dynamique de telles systèmes hybrides impose leur modélisation et l'étude de chaque source séparément. C'est ce à quoi nous consacrons ce chapitre.

## II.2 Structure du système photovoltaïque connecté au réseau électrique

### II.2.1 Classification d'un système photovoltaïque

Les générateurs solaires convertissent le rayonnement solaire entrant en électricité. En général, On classe généralement les systèmes photovoltaïques comme suit [16,17] :

- Système photovoltaïque autonome encore appelé système hors réseau,
- Système photovoltaïque branché sur le réseau,
- Système mixte.

#### II.2.1.1 Systèmes photovoltaïques autonomes

Le système indépendants ne sont pas branchés à un réseau électrique et sont dit de ce fait autosuffisants. Ces systèmes peuvent être employés pour la recharge des batteries utilisées pour stocker l'énergie ou exploiter directement l'énergie solaire disponible la nuit. Ces systèmes sont :

- Panneaux installés sur les toitures ou à l'extérieur.
- Une batterie qui stocke l'énergie produite en continu par le panneau.
- Un contrôleur de charge qui empêche la charge excessive de la batterie.
- Les onduleurs convertissent la puissance générée en courant alternatif.

La Figure II.1 montre un générateur solaire qui utilise un groupe de batteries pour stocker l'énergie afin d'alimenter une charge en courant alternatif. Une charge CC constante peut être aussi connectée en direct au banc de batteries. Il est possible d'alimenter des charges en courant alternatif sans batteries, mais dans ce cas l'utilisation est limitée au jour où l'éclairement photonique est satisfaisant pour générer la puissance requise [6]. Le rôle d'un système hors réseau est d'alimenter une ou plusieurs charges dans une région non alimentée par le réseau électrique. La performance des systèmes indépendants repose principalement sur la qualité de la batterie, qui c'est un élément de base de ce genre de système [5].

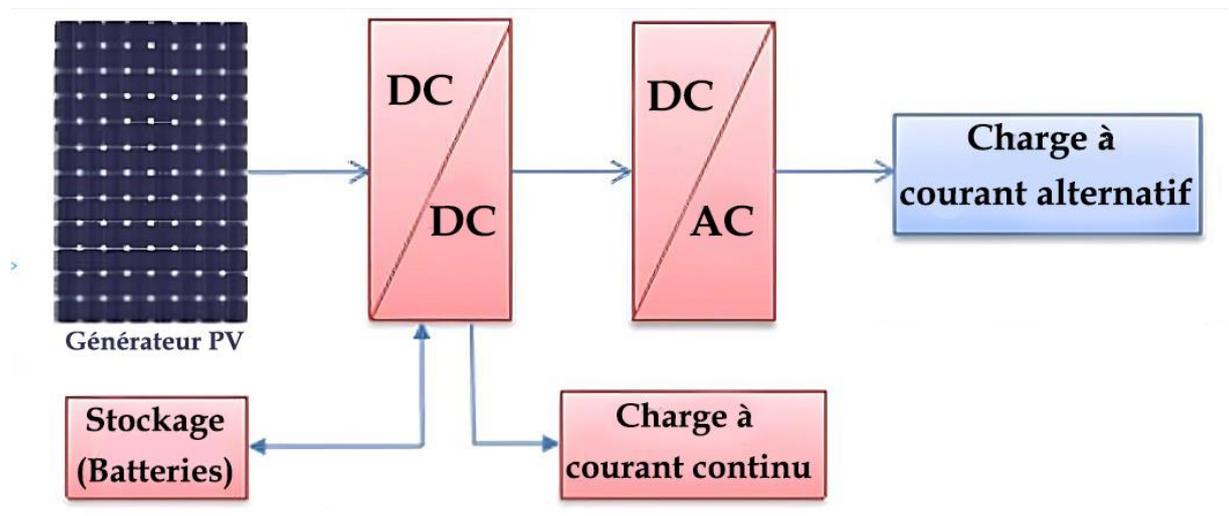


Figure II.1 Système photovoltaïque autonome.

En fonction de la demande de charge, il existe deux types de systèmes d'énergie solaire indépendants [7].

- Système indépendants dépourvu de batterie : Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de stocker l'électricité car la production d'énergie de la cellule est satisfaisante même dans des conditions de faible luminosité (par ex. ordinateur), ou le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (par ex. Pompe à énergie solaire : Le réservoir aquatique fait office de réservoir).

Système indépendant pourvu de batterie : Il s'agit de la forme la plus récurrente d'un système indépendant, appelé en anglais "standalone system". La source solaire agit comme un chargeur de batterie. Cela permet d'utiliser l'électricité à tout moment (par exemple, pour éclairer la maison la nuit).

### II.2.1.2 Système photovoltaïque connecté au réseau

Un système solaire relié au réseau interagit avec le réseau électrique. Le principal atout d'un tel système est que l'électricité peut être obtenue à partir du réseau, et si l'électricité n'est pas délivrable à partir du réseau, le système solaire peut compenser cette puissance. Ces systèmes reliés au réseau contiennent ou non des batteries stockage. Ces systèmes sont :

- Panneaux solaires installés sur toiture ou au voisinage.
- Une batterie qui stocke l'énergie DC que délivre le panneau.
- Un système de contrôle de charge pour éviter la charge excessive de la batterie.
- des convertisseurs (les onduleurs) permettant de transformer le signal de sortie continu du générateur solaire en signal alternatif qui alimenterait le réseau [6].

La Figure I.13 suivante illustre la structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

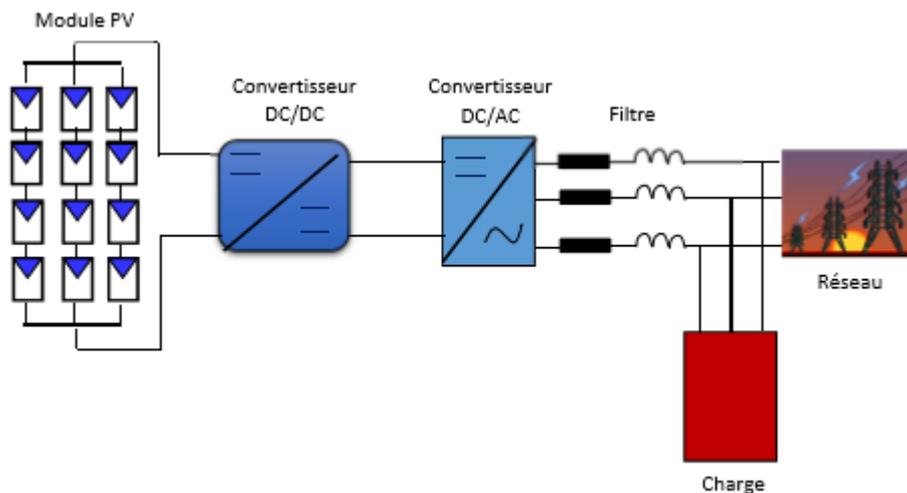


Figure II.2. Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Il existe deux catégories d'installations reliées au réseau [8-11].

- Installation centrale : Centralisation de la production d'énergie solaire à grande dimension dans les centrales solaires.
- Installation distribuée : Une variante de production distribuée directement sur les unités des lieux de consommation

Un résumé des systèmes photovoltaïque est présenté dans la Figure II.6.

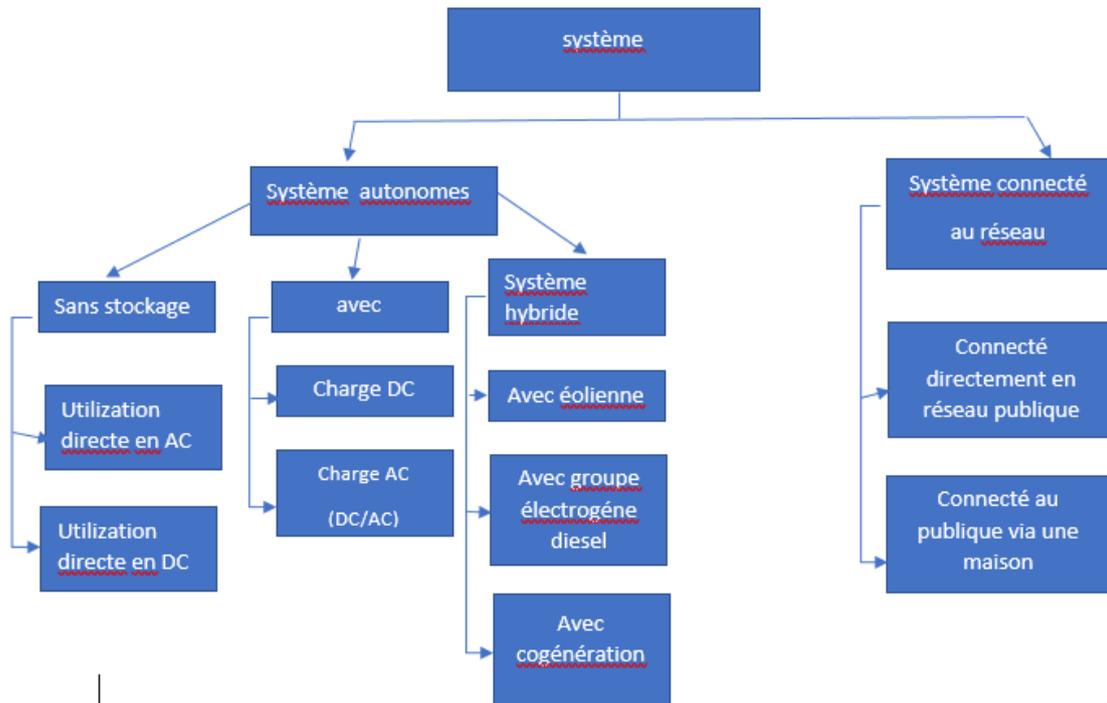


Figure II.3. Classification des systèmes photovoltaïques [6].

### II.2.1.3 Applications photovoltaïques

La technique solaire est d'utilisation possible dans diverses applications [3].

- Systèmes domestiques reliés au réseau :

C'est le système de production d'énergie solaire le plus fréquenté pour les habitations et les industriels dans les régions développées. Une fois connectée au réseau local, l'électricité produite peut être fournie au réseau pour être revendue. En cas de rayonnement solaire non satisfaisant, l'électricité est fournie par le réseau électrique. À l'aide d'un onduleur, le courant continu délivré par le système photovoltaïque est converti en courant alternatif et fourni aux équipements électriques commerciaux [3].

- Appareils connectés au réseau : Ces systèmes reliés au réseau génèrent de grandes quantités d'énergie solaire en un lieu spécifique. Ces systèmes varient en taille de centaines de kW à plusieurs MW. Quelques installations sont placées sur des bâtiments industriels géants à l'instar des aéroports et des gares. Cela l'utilisation de l'espace existant et une compensation partielle de la consommation d'électricité par ces activités consommatrice d'énergie.

Système hors réseau pour l'électrification rurale : Lorsque l'alimentation secteur n'est pas connectée, le générateur solaire est branché à la batterie à travers le régulateur de charge. Le courant alternatif peut être fourni via un onduleur, servant à l'alimentation d'un équipement électrique standard. La majorité des situations hors réseau sont usitées pour alimenter des zones reculées (refuges de montagne, pays en développement). L'électrification non citadine comprend simultanément de petits panneaux qui répondent aux besoins énergétiques de base d'un seul ménage et de grands panneaux solaires semi-connectés qui alimentent plusieurs ménages [3].

### II.3 Modélisation du générateur photovoltaïque

Plusieurs modèles de cellules solaires existent. Ils visent à obtenir des caractéristiques (I-V) pour analyser et évaluer l'efficacité des modules solaires. La modélisation des dispositifs solaires est par conséquent importante pour l'appréhension du fonctionnement des dispositifs solaires dans différentes conditions. Ces modèles se distinguent les uns des autres par l'approche et la paramétrisation nécessaire pour calculer les couples courant et tension [12]. Le modèle le plus en vogue est celui du circuit à une seule diode, un modèle non linéaire basé sur quatre composants. Une cellule solaire est représentée comme un générateur de courant, dont le fonctionnement correspond à un générateur de courant en parallèle à une diode [13].

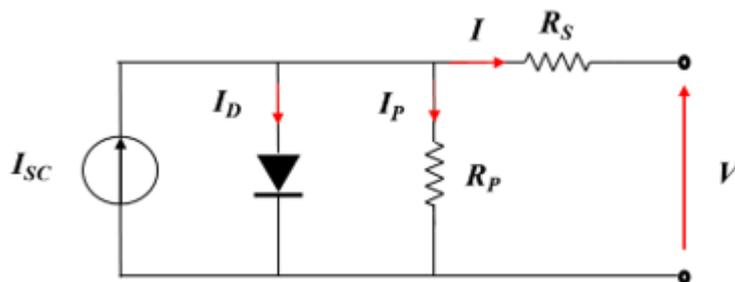


Figure II.4. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.

En utilisant la loi des nœuds, on peut écrire :

$$I_{SC} = I_D + I_P + I \quad (\text{II.1})$$

A partir de la Fig. II.4, le modèle mathématique de la caractéristique courant-tension est obtenu à partir de [14].

$$I_D = I_o \left( \exp\left[\frac{q}{m \cdot k \cdot T} (V + I \cdot R_S) - 1 \right] \right) \quad (\text{II.2})$$

De ce circuit, nous dérivons les équations pour les caractéristiques I-V de la cellule solaire.

Le courant traversant la résistance  $R_P$  est :

$$I_P = \frac{V+IR_S}{R_P} \quad (\text{II.3})$$

L'équation (II.1) donne une expression de la caractéristique I-V du modèle sélectionné.

$$I = I_{SC} - I_D - \frac{V+IR_S}{R_P} \quad (\text{II.4})$$

$$I = I_{SC} - I_o \left( \exp\left[\frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_S)\right] - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_P} \quad (\text{II.5})$$

$V$  : Tension de sortie de la cellule,

$I$  : Courant de sortie de la cellule,

$I_o$  : Courant de saturation de la diode,

$q$  : Charge d'électron ( $q=1.6 \cdot 10^{-19}$  C),

$k$  : Constant de Boltzmann ( $k= 1.38 \cdot 10^{-38}$  jk-1),

$T_c$  : Température absolue de fonctionnement de la jonction ( $k^\circ$ ),

$m$  : Facteur d'idéalité de la diode ( $m \in [1, 2]$ ). La valeur typique de  $m$  est 1.3,

$R_S$  : Résistance série,

$R_P$  : Résistance parallèle.

Un modèle analytique généralisé d'un générateur solaire peut être écrit comme [24,27] :

$$I = N_p \cdot I_{SC} - N_p \cdot I_o \left( \exp\left[\frac{q}{m.k.T_c} \left( \frac{N_S V + I.R_S(N_S/N_P)}{N_S} \right)\right] - 1 \right) - \frac{N_S V + I.R_S(N_S/N_P)}{R_P(N_S/N_P)} \quad (\text{II.6})$$

Où :  $N_P$  est le nombre de panneaux connectés en parallèle, et  $N_S$  le nombre de panneaux connectés en sérié.

### II.3.1. Caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque

On peut modéliser un panneau solaire comme étant une source de courant dépendant de l'éclairement photonique et de la température. Les courbes modèles I-V et P-V sont présentées à la Figure II.5 (a et b) pour plusieurs éclaircements et plusieurs températures. Le point de puissance maximale, appelé MPP, est sur coude de la courbe I-V et à la fin de

la courbe de puissance, et non à un point fixe. Il fluctue varie en permanence en fonction de la température et de la lumière. En vu des ces changements, le contrôleur a à poursuivre ce MPP en changeant à chaque fois mettant le cycle d'acte de l'onduleur. Un temps de réponse plus court du contrôleur (selon MPP) signifie un meilleur rendement PV et vice versa [14], [13].

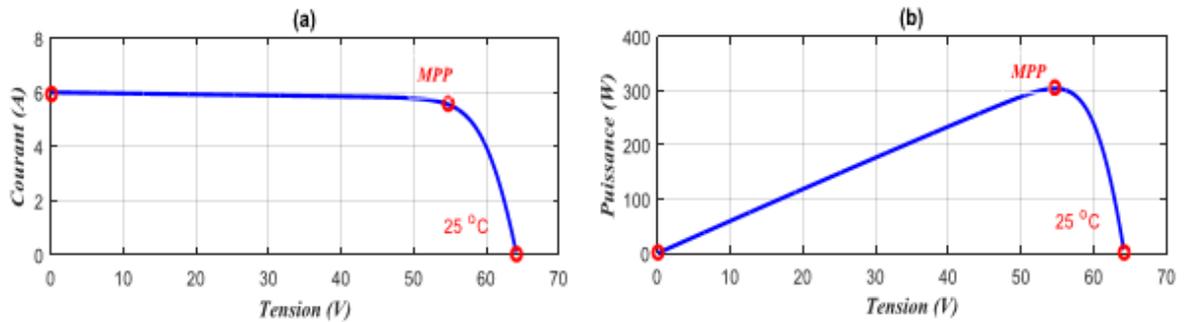


Figure II.5. Caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque dans les conditions standards.

### II.3.1.1 Influence de l'ensoleillement sur les courbes I-V et P-V

Le courant que génère un dispositif dépend proportionnellement du rayonnement solaire. Ceci n'est pas le cas pour la tension de la jonction qui ne varie que légèrement. La tension à vide ne chute que très peu lorsque la lumière est allumée [15]. Par conséquent, les performances optimales de la cellule dépendent proportionnellement de l'éclairement, avec des points de performance maximaux à peu près à la même tension.

Les courbes I-V et P-V de la Fig. II.6 sont obtenues dans des conditions de test standard (STC :  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ). A partir de la figure, on peut voir que le courant de court-circuit varie de manière proportionnelle avec la quantité de rayonnement solaire, tandis que la tension en circuit ouvert ne varie que très faiblement. On peut voir que la puissance maximale change presque proportionnellement à la quantité de rayonnement solaire. Plus explicitement, la puissance croît plus rapidement que l'éclairement, et nous pouvons conclure qu'un éclairement élevé résulte en une meilleure efficacité [16].

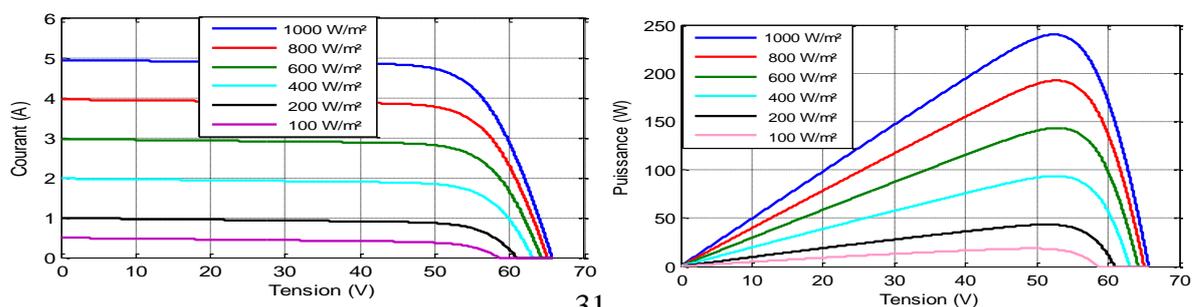


Figure II.6. Effet de l'éclairement sur (a) la courbe I-V et (b) la courbe P-V.

### II.3.1.2 Influence de la température sur les courbes I-V et P-V

Le courant de court-circuit augmente linéairement avec la température de la cellule comme c'est montré sur la Figure II.7. De plus, à mesure que la température de la cellule augmente, la tension en circuit ouvert chute de manière significative [17]. Ceci impose que ces paramètres doivent être pris en compte pour le dimensionnement correct du générateur photovoltaïque pour atteindre les performances souhaitées [18].

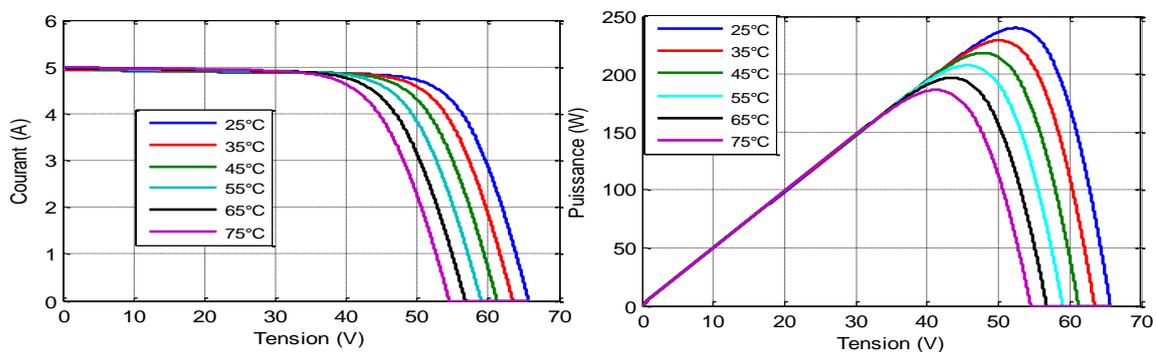


Figure II.7. Effet de la température (T) sur (a) la courbe I-V et (b) la courbe P-V.

Les influences de la température de la cellule sur le courant et la tension sont dérivées respectivement des coefficients de température du courant et de la tension. Comme l'illustre la Figure II.7(b), une augmentation de la température de la cellule affecte négativement la puissance générée par la cellule et par voie de conséquence affecte implicitement son efficacité [19].

### II.3.2 Caractéristique du module photovoltaïque

- Courant de court-circuit ICC : Il s'agit du courant maximal consommé lorsque la sortie est court-circuitée.
- VCO de tension en circuit ouvert : La ddp recueillie à la sortie de la cellule lorsqu'aucune charge n'est connectée. Elle dépend faiblement de la température et de l'irradiance [20].
- Facteur de forme: Ce dernier est le rapport de la puissance maximale délivrée par la cellule au produit du courant de court-circuit et de la tension à vide et est décrit comme :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co}I_{oc}} \quad (II.7)$$

- Efficacité de conversion: C'est le rapport la puissance électrique réellement fournie par la cellule solaire et la quantité d'énergie solaire reçue. Cette efficacité est donnée par [21] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{S.G} \quad (II.8)$$

## II.4 Modélisation simple des piles à combustible

### II.4.1 Raisons du choix la pile à combustible de type SOFC

- Pour les applications avec des températures de fonctionnement élevées, les piles à combustible à oxyde solide sont de bons candidats et ce à cause des raisons suivantes [22] :
  - Pour avoir une conductivité ionique suffisante dans les électrolytes céramiques, des températures de fonctionnement élevées (600-1100 °C) sont nécessaires. Ces températures permettent en outre l'emploi direct d'hydrocarbures. Par ailleurs, elles produisent de la chaleur à haute température facilement utilisable pour la cogénération avec ou sans turbine à gaz.
  - La résistance au soufre est 1 à 2 fois meilleure que les batteries à l'acide phosphorique (PAFC) et des batteries au carbonate fondu (MCFC).
- A cause de la technologie « tout solide », il est possible d'avoir à la fois une durée de vie plus longue et une industrialisation plus aisée que les batteries submersibles.
  - Les coûts sont réduits du fait qu'aucun catalyseur basé sur des métaux précieux tels que le platine n'est nécessaires.
  - Le dihydrogène peut être produit par reformage à la vapeur.
  - Grande variété de formes et d'architectures.
  - Haut rendement (70%) car la chaleur générée est utilisée (cogénération).
  - Faibles émissions de CO<sub>2</sub> (le CO<sub>2</sub> émis par les cellules SOFC provient du gaz naturel utilisé comme combustible pour le reformage de l'hydrogène) et pas de NO<sub>x</sub>.
  - Il n'y a pas de bruit car il n'y a pas de pièces mécaniques.

### II.4.2 Modélisation de la pile à combustible (SOFC)

La technologie SOFC est principalement basée sur des électrolytes solides (tels que les électrolytes céramiques) et opère à des températures élevées. La tension de la cellule en utilisant l'équation de Nernst ainsi que le calcul des autres voltages peuvent être obtenus en se servant du modèle électrique de la cellule SOFC. La modélisation SOFC

globale suppose que le comportement thermique de la cellule ressemble à celui d'un seul empilement. Les transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement sont considérés. La modélisation se fait en deux étapes car les dynamiques sont très différentes. La première étape s'intéresse à la modélisation thermique en supposant des variations très lentes. La température de l'anode, cathode, électrolyte, etc. sont renseignées dans les entrées du modèle électrique [23,24,27].

La modélisation de la SOFC est réalisée sous Matlab/Simulink. Notre modèle se subdivise en un modèle thermodynamique et un modèle électrochimique au vu des propriétés thermodynamiques et électrochimiques tout en respectant les lois de conservation de masse et d'énergie. La description porte sur les caractéristiques électriques. Le potentiel réversible de chaque cellule est calculé par l'équation de Nernst. Cette tension dépend de la température de fonctionnement et des pressions partielles. La modification du potentiel de la batterie peut être due à d'autres facteurs irréversibles : l'énergie d'activation, la surtension ohmique. Cela signifie que la tension de charge de la batterie est plus faible que celle de Nernst [23-25].

Le tracé que montre la Figure II.8 exhibe trois régions de surtension. Zone 1 : correspondant à de faibles courants, la surtension de démarrage a le plus grand effet. Zone 2 : C'est la plage linéaire où dominent les surtensions résistives. Zone 3 : À des courants élevés, la surtension de concentration est la perte la plus importante.

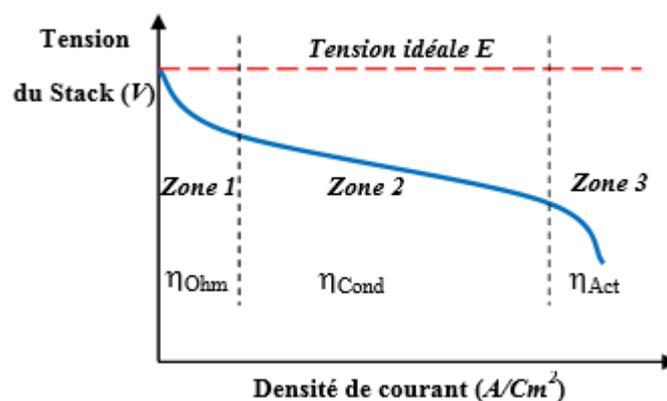


Figure II.8. Courbe de polarisation théorique d'une pile SOFC [26].

La tension de la batterie est exprimée donc comme [23,25] :

$$U_{pile} = N_{cell} \cdot (E - \eta_{ohm} - \eta_{cond} - \eta_{act}) \quad (II.9)$$

Où :

$E$  : le potentiel de Nernst,

$U_{pile}$  est la tension de la SOFC,

$N_{cell}$  : le nombre des SOFC,

$\eta_{ohm}$ ,  $\eta_{cond}$ ,  $\eta_{act}$  : sont respectivement les surtensions résistives, concentrationnelle et d'activation.

Pour rendre plus simple l'analyse, les hypothèses suivantes sont considérées [22,23] :

- L'accélérateur est idéal.
- La pression dans le canal de gaz est constante.
- le rapport de la pression intérieure à la pression extérieur est assez élevé de manière à permettre de considérer que l'ouverture a été écrasée.
- Répartition uniforme de la température dans toute la pile.
- Mixture parfaite des gaz dans la SOFC. La température de sortie du carburant et de l'air sera donc la même qu'à l'intérieur.
- Les capacités calorifiques du combustible et de l'air sont négligeables.
- Pertes de chaleur négligeable.
- Le calcul la tension en utilisant l'équation de Nernst est possible.
- La modélisation est à 1D.
- En fonctionnement normal, les pressions partielles de H2 et O2 diminuent uniformément sur toute l'anode, tandis que la pression partielle de H2O augmente de manière uniforme.

Pour le modèle thermique, la chambre de combustion n'est pas incluse dans le modèle. On suppose que l'air et le combustible sont préalablement chauffés.

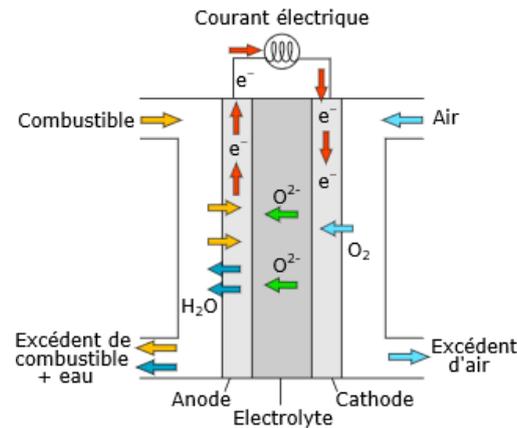


Figure II.9. Modèle d'une cellule SOFC [23].

L'hydrogène et l'oxygène diffusent via l'électrode poreuse vers les régions de réaction et la vapeur d'eau vers l'anode à mesure que le courant de charge augmente. Ainsi, lorsque la pile est en charge, des gradients de pression partielle de H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O se créent progressivement le long de l'anode et de la cathode [24, 26].

#### II.4.2.1 Calcul des pressions partielles

Un exemple d'hydrogène est donné pour déterminer la pression partielle [24,28] :

$$P_{H_2} \cdot V_{an} = n_{H_2} \cdot R \cdot T \quad (\text{II.10})$$

Tel que :

$n_{H_2}$  est le nombre d'atomes d'hydrogène.

$V_{an}$  est le volume anodique.

$R$  : Constante des gaz parfaits (8.3143 J/mol.K)

$T$  : Température du gaz (K).

Si le nombre de moles présentes dans le volume de l'anode change, la variation de pression s'exprime ainsi :

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{R \cdot T}{V_{an}} \cdot \Delta n_{H_2} \quad (\text{II.11})$$

$\Delta n_{H_2}$  étant le débit molaire de l'hydrogène (mol/s).

Cette évolution dépend du débit molaire fourni  $N_{H_2}^{in}$  à l'entrée de la pile et du débit du carburant entrant dans la réaction chimique ainsi que du débit du carburant sortant de la pile:

$N_{H_2}^0$

$$\Delta n_{H_2} = (N_{H_2}^{in} - N_{H_2}^0 - N_{H_2}^r) \quad (\text{II.12})$$

Alors

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{R.T}{V_{an}} (N_{H_2}^{in} - N_{H_2}^0 - N_{H_2}^r) \quad (\text{II.13})$$

Selon les relations d'électrochimie [23,43,44], le flux de  $H_2$  ou  $O_2$  impliqué dans la réaction est déterminé à partir du courant traversant la pile :

$$N_{H_2}^R = \frac{N_0.I}{2.F} = 2. K_r.I \quad (\text{II.14})$$

Avec

$\frac{N_0}{4.F} = K_r$  un nombre constant pris pour simplifier le modèle,  $N_0$  est le nombre des cellules sérielles,  $F$  étant la constante de Faraday ( $F= 96490$  c/mol).

Le débit d'hydrogène sortant de l'anode doit être exprimé comme fonction de la pression intérieure à l'électrode [24, 28, 43]. Considérons donc le cas généralisé d'un orifice bouché alimenté par un mélange gazeux de masse molaire (kg/kmol), représenté sur la figure (II.10).

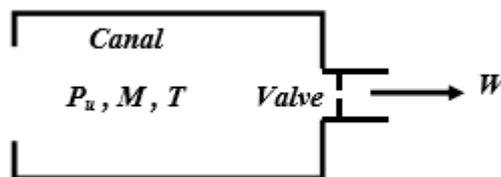


Figure II.10. Comportement du gaz dans un canal.

Pour une valeur  $T$  de température donnée, cette vanne a les propriétés suivantes :

$$\frac{W}{p_w} = K\sqrt{M} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$p_w$  est la pression intérieure du canal.

$W$  est le flux massique (kg/s).

$K$  est la constante de la valve dépendant de la surface d'orifice (kmol.kg(atm.s)).

Le débit molaire d'hydrogène sortant de l'anode  $N_{H_2}^0$ , peut être donné en fonction de la pression intérieure de l'électrode  $P_{H_2}$  par :

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{R.T}{V_{an}} (N_{H_2}^{in} - K_{H_2} \cdot P_{H_2} - 2 \cdot Kr \cdot I) \quad (II.16)$$

La transformée de Laplace appliquée à l'équation (II.12) donne :

$$P_{H_2}(S) = \frac{\frac{1}{K_{H_2}}}{1 + \left(\frac{V_{an}}{RTK_{H_2}}\right)S} \cdot \left(N_{H_2}^{in} - \frac{2N_0.I}{4F}\right) \quad (II.17)$$

En posant  $\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{RTK_{H_2}}$ , on obtient :

$$P_{H_2}(S) = \frac{\frac{1}{K_{H_2}}}{1 + (\tau_{H_2})S} \cdot \left(N_{H_2}^{in} - \frac{2N_0.I}{4F}\right) \quad (II.18)$$

La même procédure pour  $O_2$  et  $H_2O$  donne :

$$P_{O_2}(S) = \frac{\frac{1}{K_{O_2}}}{1 + (\tau_{O_2})S} \cdot \left(N_{O_2}^{in} - \frac{2N_0.I}{4F}\right) \quad (II.19)$$

$$P_{H_2O}(S) = \frac{\frac{1}{K_{H_2O}}}{1 + (\tau_{H_2O})S} \cdot \left(\frac{2N_0.I}{4F}\right) \quad (II.20)$$

$$\tau_{O_2} = \left(\frac{V_{cathode}}{RTK_{O_2}}\right) \quad (II.21)$$

$$\tau_{H_2O} = \left(\frac{V_{an}}{RTK_{H_2O}}\right) \quad (II.22)$$

#### II.4.2.2 Rapport optimal entre les débits des réactants

Pour que la réaction avec  $H_2$  soit aussi complète que possible,  $O_2$  est toujours débité en supplément. Ceci est assuré par le fait que le rapport stoechiométrique  $H_2/O_2$  est de 1-2. Pour ajuster la différence de pression en deçà de 4 kPa dans les conditions naturelles [23, 24, 27].

Le rapport  $r_{H-O}$  entre les flux  $H_2/O_2$  doit être aux environs de 1.145. Pour que ce rapport reste stable, le flux d'oxygène est ajusté de manière indirecte via la vitesse du compresseur d'air. Le temps de réponse de cette régulation de la vitesse du compresseur est si petit par rapport aux temps utilisées pour décrire l'opération ; il est donc négligé.

$$N_{O_2}^{in} = \left(\frac{1}{r_{H-O}}\right) \cdot N_{H_2}^{in} \tag{II.23}$$

L'équation (IV.5) donne la valeur suivante pour la tension de la batterie :

$$U_{pile} = U_0 \left( E^0 + \frac{RT}{nF} \log \left( \frac{P_{O_2}^{0.5}(S) \cdot P_{H_2}(S)}{P_{H_2O}(S)} \right) - \frac{RT}{nF} \ln \left( 1 - \left( \frac{i}{i_1} \right) \right) - \frac{RT}{\alpha C} \log \left( \frac{i}{i_0} \right) - \alpha \cdot \exp \left( \beta \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \tag{II.24}$$

Le jeu d'équations ci-dessus (II.14), (II.15), (II.16) et (II.20) permet de générer le diagramme du modèle dépendant du temps de la pile SOFC. Ce diagramme est représenté sur la figure II. 11.

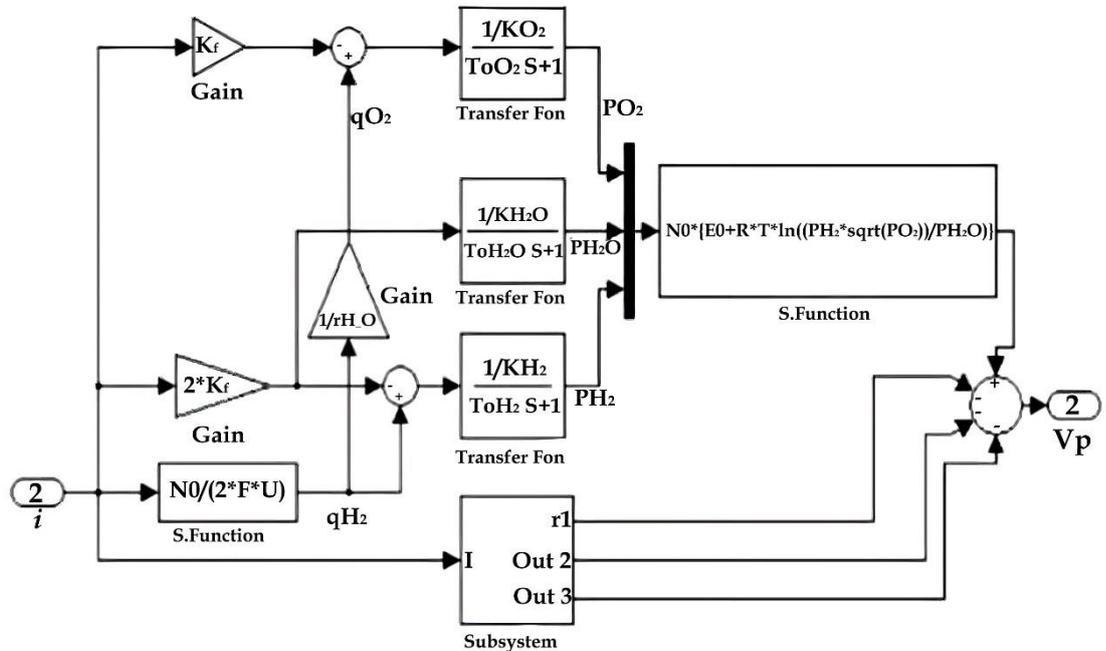


Figure II.11. Modèle dynamique de la pile SOFC.

### II.5 Modélisation des convertisseurs (DC/DC)

Un convertisseur de tension DC/DC est un dispositif (ou mini-dispositif) qui produit un voltage régulée à sa sortie, et isolée du voltage appliqué. Cette conversion se fait par découpage de fréquence élevée qui se caractérise par une haute efficacité pouvant atteindre 94%. Il existe de nombreux types de convertisseurs DC/DC dans la littérature et le choix est dicté par l'usage.

Dans un équipement d'alimentation hybride composé d'une source d'alimentation continue, un hacheur permet de suivre la puissance et la tension à la sortie. Un hacheur est un dispositif qui peut générer un voltage constante ou changeable en allant de n'importe quel voltage continu.

Le temps durant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de commutation  $T$  de l'interrupteur hacheur est appelé le rapport cyclique  $\alpha$  qui varie entre 0 et 1. Ce rapport est donné par [29] :

$$\alpha = \frac{\tau}{T_s}, \tau = \alpha \cdot T_s \quad (\text{II.25})$$

$\alpha$ : le rapport cyclique,

$\tau$  : le temps à l'état fermé,

$T$  : la période.

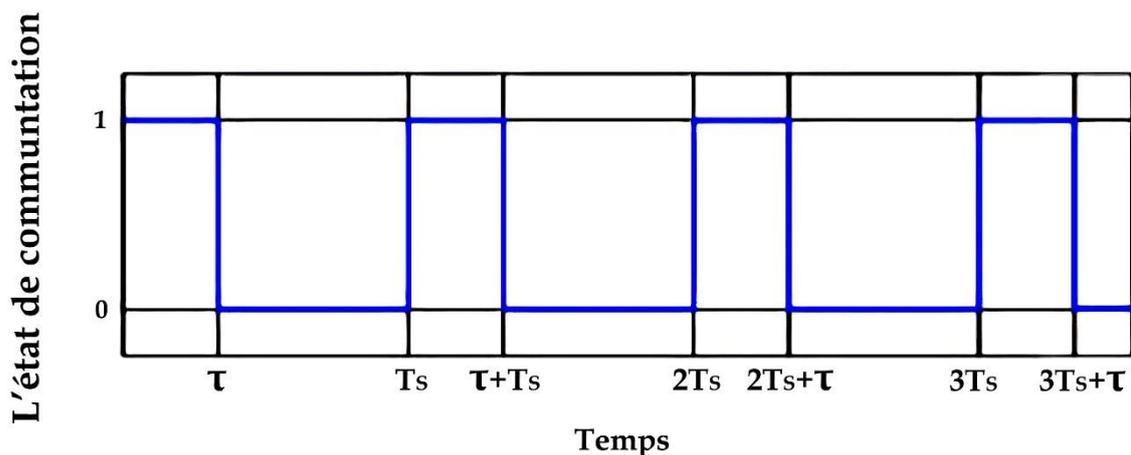


Figure II.12. La forme de variation en fonction du rapport cyclique.

L'état de commutation: 0 pour l'interrupteur ouvert et 1 pour l'interrupteur fermé.

### II.5.1 Hacheur (Boost)

Un convertisseur augmentateur est un convertisseur de puissance non complexe qui consiste principalement en un générateur de voltage, une bobine, des interrupteurs semiconducteurs (TECMOS ou BTGI) et des diodes. Il a également couramment un filtre pour améliorer le voltage à la sortie [29]. Il a pour rôle d'augmenter le voltage direct jusqu'à la valeur requise, comme c'est mentionné sur la Figure II.13 [30] D ouvert et K fermé ; et lorsque K ouvert, D fermé. Pendant chaque cycle, K est passant entre 0 et  $\alpha T$  et bloquant

entre  $\alpha T$  et  $T$ . Il existe deux façons d'opération suivant le courant dans l'inductance est nul (passage discontinu) ou non (passage continu).

Nous nous mettons dans le deuxième cas qui présente plus d'importance. Le schéma fonctionnel de ce dispositif est donné par la Figure II.13 qui montre aussi le digramme temporel de fonctionnement. la période de passage conduction de l'interrupteur et de la diode, ainsi que les courbes de courant (gauche) et de voltage (droite) [31,33].

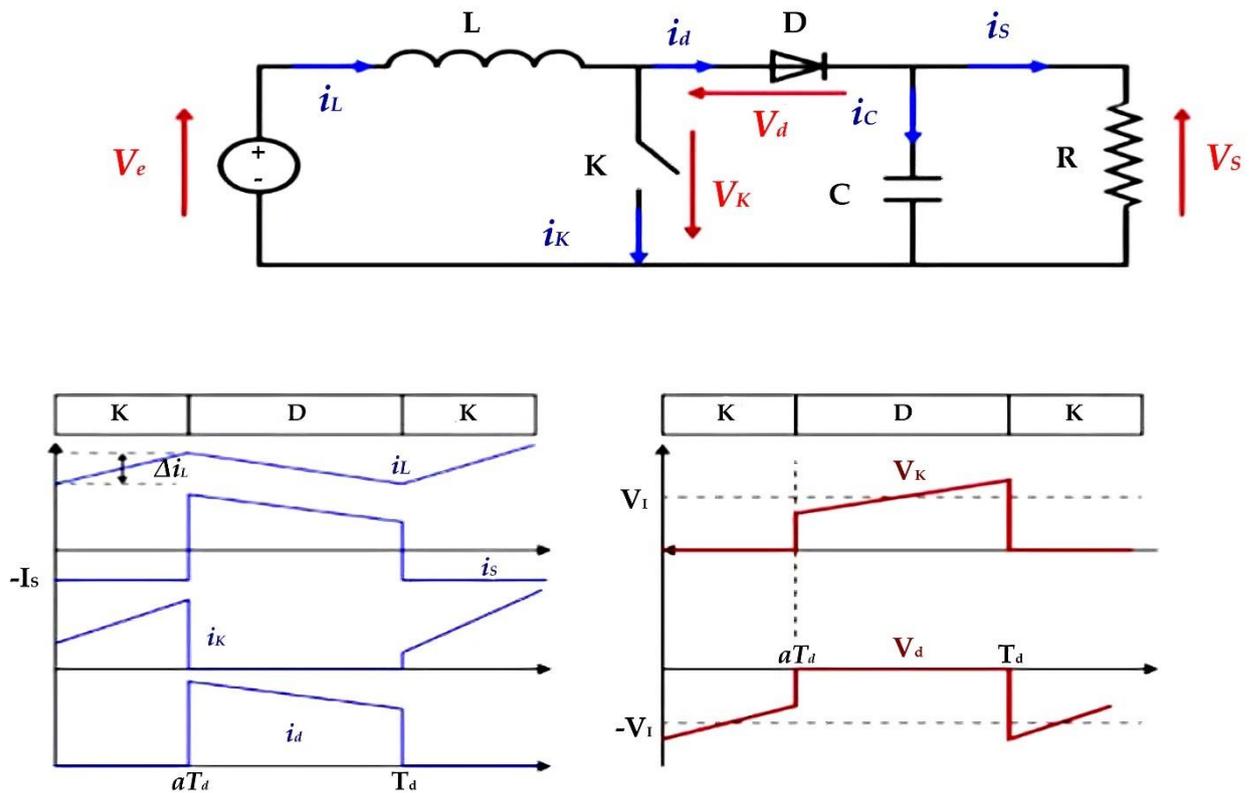


Figure II.13. Diagramme de fonctionnement d'un convertisseur Boost.

Un modèle analytique pour un convertisseur boost est :

Si l'interrupteur K est fermé ( $0 < t < \alpha T_d$ ), et l'interrupteur K est ouvert ( $\alpha T_d < t < T_d$ ), le schéma représentant le convertisseur est donné par la Figure (II.14) [31].

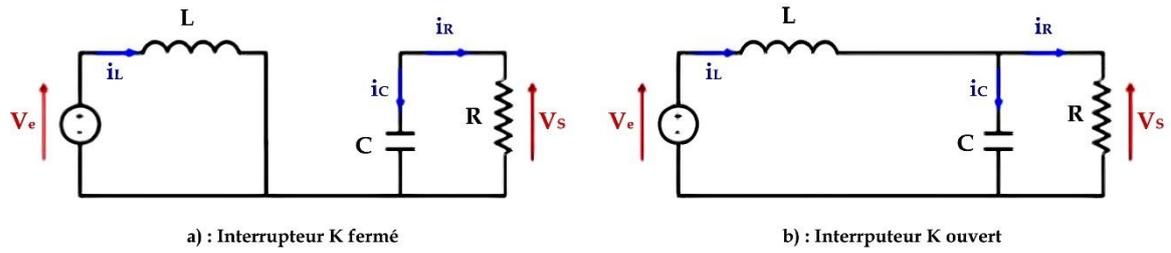


Figure II.14. Schéma équivalent du Boost quand dans le cas passant.

$$L \frac{di_t}{dt} = V_e \quad (\text{II.26})$$

$$i_L = i_{min} + \frac{V_e}{L} t \quad (\text{II.27})$$

avec  $i_{min}$  le courant minimal traversant l'inductance.

Pour  $t = \alpha T$ , le courant qui traverse l'inductance est à son maximum  $i_{max}$  :

$$i_{max} = i_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (\text{II.28})$$

Dans le cas K ouvert ( $\alpha T_d < t < T_d$ ), le schéma du dispositif est donné dans la Figure II.14 (b).

$$V_e - V_s = L \frac{di_t}{dt} \quad (\text{II.29})$$

$$i_L = i_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (\text{II.30})$$

Quant  $t = T_d$ , le courant passant dans l'inductance retrouve sa valeur minimale  $i_{min}$  :

$$i_{min} = i_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha T_d) \quad (\text{II.31})$$

En assimilant les valeurs d'ondulation de courant des équations (II.24) et (IV.27), la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  peut être dérivée [31].

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II.32})$$

Notez que la tension de sortie du convertisseur peut être contrôlée en modifiant la tension d'entrée ou le rapport cyclique. Comme il est toujours compris entre 0 et 1, le circuit agit comme un amplificateur de tension [32].

Le fonctionnement du hacheur de suralimentation présente deux modes. L'un dit de conduction continue dans lequel le courant de l'inductance ( $i_L$ ) est toujours différent de 0. L'autre mode est dit de conduction discontinue dans lequel  $i_L$  est nul pendant une partie de la période de hachage.

Il existe deux façons pour stabiliser la tension de sortie. La première est basée sur la boucle de contrôle de tension et la seconde est axée sur la construction de deux boucles de régulation de tension et de courant [24, 26].

En général, il existe deux techniques les plus courantes pour contrôler les convertisseurs DC/DC :

- Technique linéaire : Ici, on utilise un correcteur linéaire (PI ou PID). Cette façon a déjà été utilisée dans plusieurs cas. Ces contrôleurs sont basés sur des modèles à petits signaux autour du point d'équilibre nominal. Les résultats de cette démarche sont satisfaisants.
- Technique non linéaire (NL) : Il s'agit de mettre en œuvre une commande NL telle que celle à mode glissant, généralement d'usage dans les convertisseurs de puissance grâce à sa stabilité, robustesse et bande passante élevée. Cette démarche consiste à déplacer le chemin d'état du système considéré où un circuit de commutation convenable la fera osciller jusqu'à se rapprocher d'un point d'équilibre sur cette surface. Son inconvénient majeur est qu'il produit un signal de commande dont la fréquence est variable.

### II.5.2 Hacheur (Buck-Boost)

Le convertisseur abaisseur dessiné sur la Figure II.15 est un circuit électronique de puissance parmi les plus directs. Il contient principalement une inductance, un interrupteur électronique (TECMOS ou BTGI) et une diode. Un condensateur peut être ajouté pour le lissage du voltage de sortie. Il a pour objectif d'abaisser la composante continue [30,33].

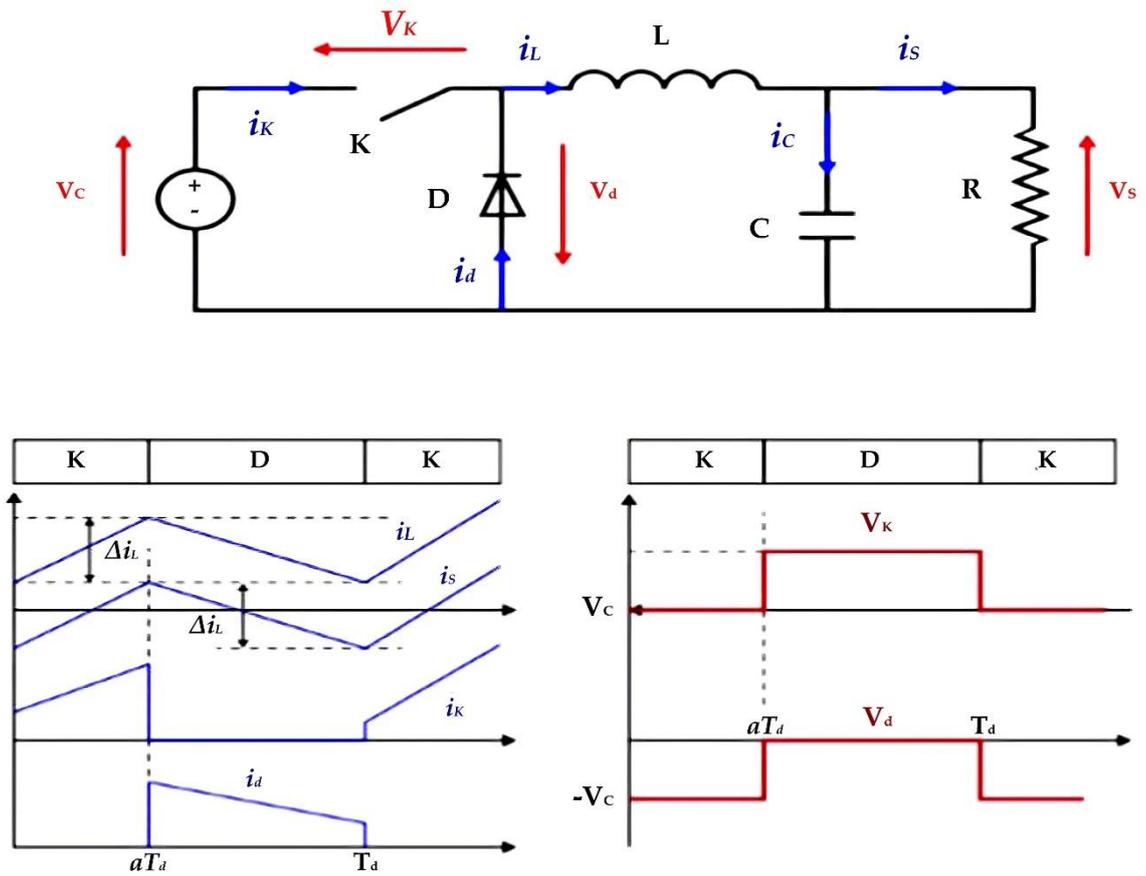


Figure II.15. Diagramme de fonctionnement d'un dispositif Buck.

L'idée de base du fonctionnement du hacheur est subdivisé en deux cas suivant que l'interrupteur est passant ou bloqué.

A la fermeture de l'interrupteur, l'inductance présente entre ses bornes un voltage indiqué par l'équation. Le courant à travers l'inductance croit de manière linéaire. Comme le voltage de la diode est négatif, aucun courant ne circule [35].

$$V_L = V_e - V_s \tag{II.33}$$

Dans la situation de blocage, l'interrupteur n'est pas fermé. La diode conduit et assure l'écoulement du courant dans l'inductance. L'équation II.35 donne le voltage de l'inductance. Le courant qui circule dans l'inductance diminue [34].

$$V_L = -V_s \tag{II.34}$$

Le comportement du voltage est illustrée à la Figure (II-16).

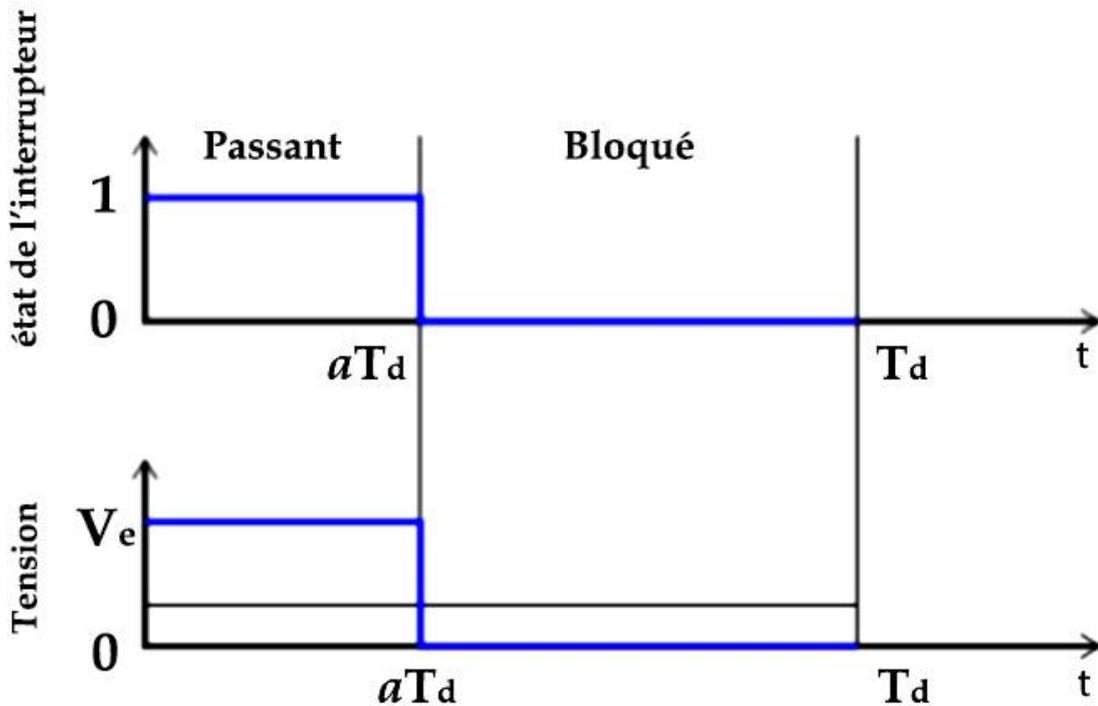


Figure II.16. Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck.

A partir de cette Figure on constate que :  $V_s = V_e$  dans l'état fermé, et  $V_s = 0$  dans l'état ouvert.

$$V_s = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T_d} V_s dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T_d}^{T_d} 0 dt = \frac{1}{T} V_s (\alpha T_d), V_s = \alpha V_e \quad (\text{II.35})$$

## II.6 Modèle du convertisseur (DC/AC)

Un convertisseur à plusieurs niveaux produit un voltage constitué d'une multitude de niveaux ( $>3$ ). Ceux-ci permettent à la tension de sortie des convertisseurs de puissance de dépasser les limites imposées par les semiconducteurs [35]. Les avantages incluent : Perte de puissance, volume de filtre, distorsion harmonique sont tous favorablement atténués, facteur de qualité amélioré, contraintes électriques diminués. Notez cependant qu'il existe de nombreux composants électriques et qu'il est nécessaire d'égaliser la tension aux bornes des condensateurs du bus barre CC [36-39].

### II.6.1 Onduleur NPC (Neutral Point Clamping) à trois niveaux

### II.6.1.1 Structure générale de l'onduleur à trois niveaux

Notre onduleur à 3 phases avec trois niveaux et un point médian est formé de 3 bras uniformément distribués. Chaque bras contient 4 doublets (diode/transistor) faisant office d'interrupteurs à 2 directions, et 2 diodes intermédiaires étiquetées DDK0 et DDK1 qui favorisent l'obtention la valeur zéro pour le voltage  $V_{KM}$  à la sortie de l'onduleur.

La structure de l'onduleur NPC à 3 niveaux caractérisé par [46-49] est donné par la Figure II.17:

- les voltages continus à l'entrée :  $U_{c1}, U_{c2}$ ,
- les voltages alternatifs à la sortie :  $V_A, V_B, V_C$ ,
- les courants de sortie :  $i_1, i_2, i_3$ ,
- les courants  $i_{d0}, i_{d1}$  et  $i_{d2}$  déterminant le sens de propagation d'énergie.

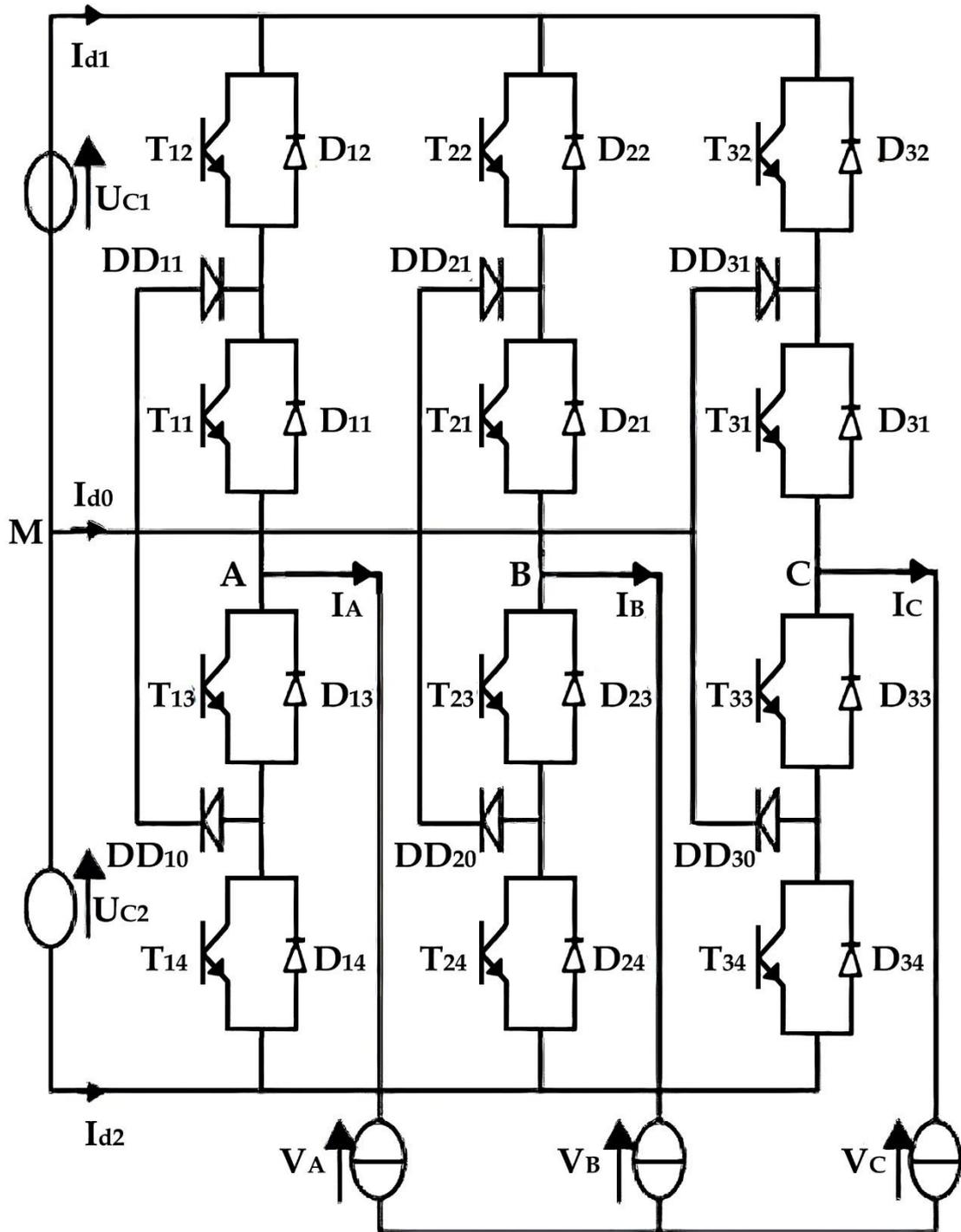


Figure II.17. Schéma général de l'onduleur 3 niveaux.

### II.6.1.2 Modélisation de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC

#### II.6.1.2.1 Comment fonctionne un bras d'onduleur 3 niveaux

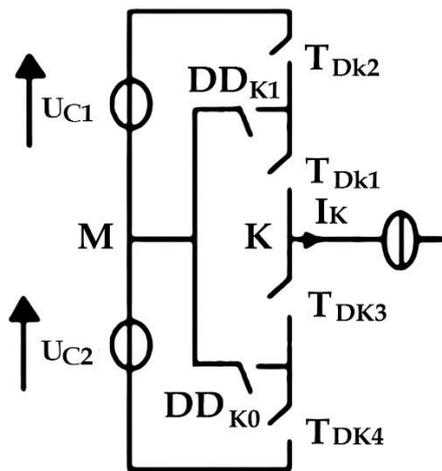
- Chaque paire transistor-diode est représentée par un seul interrupteur bidirectionnel supposé idéal.

- Vu la symétrie de la structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux, la modélisation de ce dernier se fait par bras.

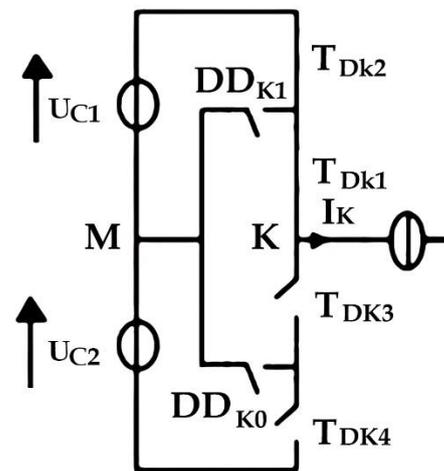
D'un point de vue topologique, un bras d'onduleur 3 étages présente 5 configurations éventuelles (E0 à E4) comme décrit sur la Figure II.18. Nous décrivons différents cycles opérationnels d'un onduleur 3 étages en utilisant les tensions VAM complètement déterminées par les 4 commutateurs par bras [44,45]. Considérons les hypothèses suivantes [41-43] pour simplifier .

- Chaque doublet transistor-diode est considéré comme un interrupteur bidirectionnel idéal et unique .

- Compte tenu de la symétrie que possède l'onduleur à 3 phases et 3 étages, on restreindra la modélisation à un bras.



Configuration E<sub>0</sub>



Configuration E<sub>1</sub>

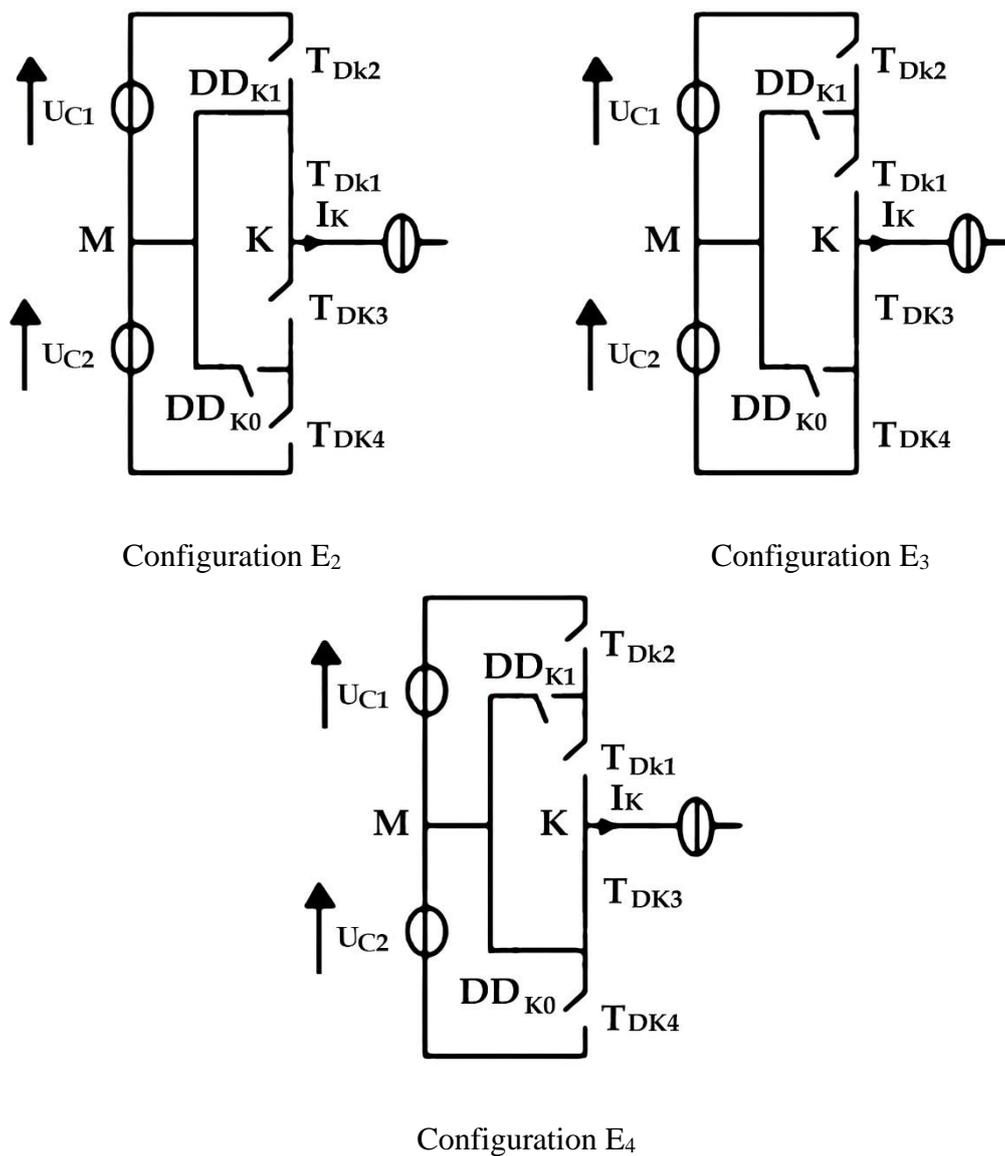


Figure II.18. Différentes configurations du bras K de l'onduleur à trois niveaux.

Les configurations possibles en fonction de  $V_K$  (nœud K du bras K) sont données par le Tableau II.1.

Tableau II.1. Différents cas configurationnels suivant le voltage  $V_K$ .

Configurations possibles	Grandeur caractéristique
E <sub>0</sub>	$V_K = 0$
E <sub>1</sub>	$V_K = +U_{C1}$
E <sub>2</sub>	$V_K = 0$

E <sub>3</sub>	V <sub>K</sub> = - U <sub>C2</sub>
E <sub>4</sub>	V <sub>K</sub> = 0

### II.6.1.2.2 Modèle de connaissance et de commande

La fonction de liaison F<sub>KS</sub> représente la situation ouvert ou fermé de T<sub>DKS</sub>. Chaque commutateur K<sub>KS</sub> considéré comme étant parfait laisse insérer une fonction de liaison F<sub>KS</sub> :

$$F_{KS} = \begin{cases} 1 & \text{si } TD_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } TD_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

On rappelle que l'on a une commande dédiée des différents semiconducteurs d'un bras de l'onduleur à 3 étages dans le but de contourner la conduction simultanée des 4 commutateurs qui peut résulter en leur défaillance lors d'un courant de court-circuit ou d'une surtension si tous les interrupteurs sont ouverts à la fois. Diverses commandes qui se complètent entre elles demeurent envisageables. La meilleure façon est la suivante :

$$\begin{cases} B_{K4} = \overline{B_{K1}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K2}} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

B<sub>KS</sub> étant la commande du commutateur électronique T<sub>KS</sub>.

Les tensions à la sortie ainsi que les éléments en conduction correspondant à chaque situation d'interruption sur le bras sont donnés par le Tableau II.2.

Tableau II.2. Etats de commutation

Etat de commutation				Tension de sortie	Eléments conducteurs	
B <sub>K1</sub>	B <sub>K2</sub>	B <sub>K3</sub>	B <sub>K4</sub>			
F	F	O	O	± U <sub>C</sub>	TD <sub>K1</sub> et TD <sub>K2</sub>	DD <sub>K0</sub> et DD <sub>K1</sub>
F	O	F	O	± (U <sub>C</sub> /2)	DD <sub>K1</sub> et TD <sub>K2</sub>	DD <sub>K0</sub> et TD <sub>K1</sub>
O	O	F	F	Nulle	DD <sub>K0</sub> et DD <sub>K1</sub>	TD <sub>K3</sub> et TD <sub>K4</sub>
O	F	O	F	-	/	/

La fonction de liaison du demi-bras F<sub>Km</sub><sup>k</sup> est définie telle que:

K : numéro du bras .

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi-bras du bras bas} \\ 1 & \text{pour le demi-bras du bras haut} \end{cases}$$

Grâce à la fonction de liaison du commutateur, la fonction de liaison d'un demi-bras est représentée par la forme suivante.

$$F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \quad \text{et} \quad F_{K0}^b = F_{K3} \cdot F_{K4} \quad (\text{II.38})$$

La fonction de la liaison demi-bras est donc  $F_{Km}^b = 1$  si les deux commutateurs sur un demi-bras sont ON, sinon  $F_{Km}^b = 0$ .

#### II.6.1.2.3 Modélisation des valeurs instantanées

L'approche modélisatrice tient en compte que l'onduleurs à 3 phases alimente une charge triphasée à l'équilibre. Nous appelons:

- Voltage simple aux bornes de chaque phase relative à la charge :  $V_a, V_b, V_c$ ,
- Voltage entre le point milieu M de chaque bras et le point neutre O de l'alimentation continue de l'onduleur :  $V_{ao}, V_{bo}, V_{co}$ .

Considérons une charge triphasée symétrique en étoile.

#### Les potentiels Vio

Les potentiels des nœuds A, B, C de l'onduleur à 3 phases et 3 étages par référence au point milieu M, s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{a0} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{c1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{c2} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{13} F_{14}) \frac{E}{2} \\ V_{b0} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{c1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{c2} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{23} F_{24}) \frac{E}{2} \\ V_{c0} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{c1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{c2} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{33} F_{34}) \frac{E}{2} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Pour un onduleur à 3 phases et 3 étages, la fonction de liaison des demi-bras est donnée ainsi :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11} \cdot F_{12} & F_{21}^b = F_{21} \cdot F_{22} & F_{31}^b = F_{31} \cdot F_{32} \\ F_{10}^b = F_{13} \cdot F_{14} & F_{20}^b = F_{23} \cdot F_{24} & F_{30}^b = F_{33} \cdot F_{34} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

En convertissant ces fonctions de liaison des demi-bras à l'ensemble (II.41), on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{a0} = F_{11}^b \cdot U_{c1} - F_{10}^b \cdot U_{c2} = (F_{11}^b - F_{10}^b) \frac{E}{2} \\ V_{b0} = F_{21}^b \cdot U_{c1} - F_{20}^b \cdot U_{c2} = (F_{21}^b - F_{20}^b) \frac{E}{2} \\ V_{c0} = F_{31}^b \cdot U_{c1} - F_{30}^b \cdot U_{c2} = (F_{31}^b - F_{30}^b) \frac{E}{2} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

### Tensions de sorties

A l'aide du jeu d'équations II-43, on peut déterminer la tension à la sortie de l'onduleur exprimée en fonction des deux tensions d'entrée  $U_{c1}$  et  $U_{c2}$ . Un onduleur à 3 niveaux peut être considéré comme une connexion sérielle de 2 onduleurs à 2 niveaux, chaque branche de l'un de ces onduleurs étant un demi-bras de l'onduleur à 3 étages. Compte tenu de ces conditions, on peut écrire un modèle reliant les fonctions des demi-bras et les voltages aux pôles de charge VA, VB, VC.

### Tensions composées

Les divers voltages entre phases d'un onduleur à 3 phases et 3 étages sont écrits comme les fonctions de liaison des commutateurs :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{21} F_{22}) \cdot U_{c1} - (F_{13} \cdot F_{14} - F_{23} F_{24}) U_{c2} \\ V_{bc} = V_{c0} - V_{b0} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{31} F_{32}) \cdot U_{c1} - (F_{23} \cdot F_{24} - F_{33} F_{34}) U_{c2} \\ V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{11} F_{12}) \cdot U_{c1} - (F_{33} \cdot F_{34} - F_{13} F_{14}) U_{c2} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Dans le cas où  $U_{c1} = U_{c2} = E/2$ , le système II.44 devient :

$$\begin{cases} V_{ab} = [(F_{11} \cdot F_{12} - F_{21} F_{22}) - (F_{13} \cdot F_{14} - F_{23} F_{24})] \frac{E}{2} \\ V_{bc} = [(F_{21} \cdot F_{22} - F_{31} F_{32}) - (F_{23} \cdot F_{24} - F_{33} F_{34})] \frac{E}{2} \\ V_{ca} = [(F_{31} \cdot F_{32} - F_{11} F_{12}) - (F_{33} \cdot F_{34} - F_{13} F_{14})] \frac{E}{2} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

Les divers voltages entre phases **d'un onduleur** à 3 phases **sont exprimées par les** fonctions sur les demi-bras :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right) \quad (\text{II.44})$$

Pour  $U_{c1} = U_{c2}$ , cette relation se simplifie en :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{2} \quad (\text{II.45})$$

#### d) Tensions simples

Le voltage de sortie phase-neutre de l'onduleur est dérivée à partir du potentiel du nœud relativement au point médian par l'expression :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{II.46})$$

$$\begin{cases} V_a = (2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0})/3 \\ V_b = (2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0})/3 \\ V_c = (2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0})/3 \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

Soit sous forme de matrice :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{2} \quad (\text{II.48})$$

#### Courants d'entrée

Les courants continus d'entrée ( $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$ ,  $I_{d3}$ ) de l'onduleur sont déterminés à partir des courants alternatifs des charges  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  à travers les fonctions de connexion des interrupteurs. Ces courants s'expriment par :

$$\begin{cases} I_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot I_a + F_{21} F_{22} \cdot I_b + F_{31} F_{32} \cdot I_c \\ I_{d2} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot I_a + F_{23} F_{24} \cdot I_b + F_{33} F_{34} \cdot I_c \\ I_{d3} = F_{12} \cdot F_{13} \cdot I_a + F_{22} F_{23} \cdot I_b + F_{32} F_{33} \cdot I_c \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

L'ensemble (II.51) est obtenu en remplaçant la fonction de liaison des interrupteurs par celle des demi-bras :

$$\begin{cases} I_{d1} = F_{11}^b \cdot I_a + F_{21}^b \cdot I_b + F_{31}^b \cdot I_c \\ I_{d2} = F_{10}^b \cdot I_a + F_{20}^b \cdot I_b + F_{30}^b \cdot I_c \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Le courant  $I_{d0}$  s'écrit à l'aide des courants d'entrée ( $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$ ) et de ceux de charge  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  comme :

$$I_{d0} + I_{d1} + I_{d2} = I_a + I_b + I_c \quad (\text{II.51})$$

$$I_{d0} = (I_a + I_b + I_c) - (F_{11}^b \cdot F_{10}^b)I_a - (F_{21}^b \cdot F_{20}^b)I_b - (F_{31}^b \cdot F_{30}^b)I_c \quad (\text{II.52})$$

Finalement, on obtient la forme en matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{d2} \\ V_{d0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 1 - F_{11}^b - F_{10}^b & 1 - F_{21}^b - F_{31}^b & 1 - F_{31}^b \cdot F_{30}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.53})$$

### Matrice de conversion simple [N(t)]

Si on prend comme variables d'état du jeu : source de tension continue, onduleur à 3 phases, charge triphasée inductive, le vecteur d'état ci-après :

$$X = [U_{c1} \ U_{c2} \ I_a \ I_b \ I_c]^t \quad (\text{II.54})$$

Les variables internes sont données par :

$$U_{sim} = [V_a \ V_b \ V_c \ I_{d1} \ I_{d2} \ I_{d0}]^t \quad (\text{II.55})$$

Nous aboutissons à la matrice de transformation simple [N(t)] suivante :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \cdot \begin{bmatrix} U_{c1} \\ U_{c2} \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.56})$$

En employant les tensions phase-neutre (II.43), nous arrivons à une matrice de transformation simple :



passés à la pile à combustible SOFC dont les pressions partielles et le rapport optimal entre les débits des réactants ont été déterminées. L'étude des convertisseur DC/DC, en l'occurrence les hacheurs boost et buck-boost ont été traités par la suite avec les convertisseurs DC/AC. La structure de ces derniers a été présentée ainsi que sa modélisation.

## Références

- [1] R. M. Bengourila, R. Mahli, S. Sida, L. Hassine , Leonardo Electron. J. Practices and Technol. 16, no.31 (2017) 218-234.
- [2] C. Huaa, J. Lin, Cjh. Shen, Implem of DS, IEEE Trans. Imd. Electron. 45 (1) (1998) 99-107.
- [3] A. Yr n.M. Yasim, , Thèse de Doctorat, Univ Dli- Stdi dii Cata- cuola Superiore di Catania, Sp, 2000.
- [4] K. aboutet, N. iloz, , Le manuel du Profess, Ed. Dunod, 2000, Pari, France.
- [5] [http : /w.phltique.info/.../Epiia\\_Techmo](http://w.phltique.info/.../Epiia_Techmo), Site Photue.info.
- [6] LK. uaghba , Thèse de Doctorat, Bimkra, 2007.
- [7] JR. Toyer, Y. Djako, EZ. chiler, FB. Saada Sily, , IEEP, Univ Otazwa, IER, EPA, 1999.
- [8] B. Delala, , Thèse de Doctorat, Université de Batmna 1, 2009.
- [9] CR. Hemni , Thèse de doctorat en Phisique Enmrgétique, Université Memtouni, Constantime, 2006.
- [10] Rabort, 2012, [www.rti.france.2020](http://www.rti.france.2020)  
Site pije démonstratiom à yVREUs dans l’Eur.
- [11] AZ. ijaauNar, jA.uT. varaan, M.varajam, yecouples, Electrocal Pozwer and Emnergy Systems 68 (2005) 1-12
- [12] AM.kl. Radj, (EMNP), 2002.
- [13] M .R .Bengourima , Thèse de Doctorat, Université d’Orman, 2022.
- [14] T.B. Nohamed Chouri, Thèse de Doctorat, Univ. H. Poimncarré, Mancy 1, 2004.
- [15] O. Cal, Thèse de Doctorat, Université Paul Shabatir, Toulouwe 3, 2008.
- [16] A. Clonso, Université Paul Shabatir de Toulouwe, 2003.
- [17] A. Nouchiche, M. Bencherif, A. HadjA, M. cheikh, S. Ranadam, A. Cheik, , Int. J. Emerg. Electr. Power Syst. 17 (2016) 529-39.
- [18] AS. deslenm, these université De SCétif , 2012.
- [19] J. amons, , Deregulation, and Implementing Technology in Power Generation with Respct to the Kyto Protcol. 9<sup>th</sup> Int. Univ. Powger Enmg. Conf. 2000. UPE 2000,

- [20] ZP. Framk, E. Nercad, SG. ariegui, R. De Domcker, Renevabe Enmergy Suply of uytill.2013.
- [21] N. Rarhat, N.M. Yussein .M. Atalah,( PI-GA ) Controller. 19th Int. Middle East Power Syst. Conf. (MEPCON).
- [22] F.J. mauagueni, Thèse de Doctorat, Université de oram, 2022.
- [23] N .B. Wolfgang, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de espain , 2003.
- [24] S.P. Khoushil , Z. omar, R. Monsour , A.A. amkat , V. Mejhaul,.A. Abul, Proton Exchange Memmbrane Hodrogen Fuoel Celol as the Grid Conected Powzer Generator, *Energies* (2020), 13, 66791.
- [25] M.T. Benmessaoud, , Thèse de Doctorat, Université d’Oran, 2013.
- [26] Z. Yamina , , Thèse de Doctorat, Université de jijel, 2018.
- [27] P. Jadamms, RG. Z.ramo. J. Machirad, Ann Inmtegrated (SaOFiC) Plan Doynamic Model for Power Systems Simulations, *J. Powzer Sources*, v 816, No.1-2 (2100) 495-500.
- [28] A.B. haharamchi, Doctoral Thesis, University ofbritab Miami, USA, 2009.
- [29] Q. ezika, S. Eathy and E. Abdelamin, Different Global MPT Techmniques Based on Meta-Heuristic Algorithms for Photovoltaic Systeme Renewable and Sustainable Energye *Reviess* 74 (2017) 3717-3286.
- [30] M. Achiche, , Thèse de Doctorat, Université de Betna, 2020.
- [31] N.L.khadir,these ,setif, 2006.
- [32] D. Teauvais,L. hevillare, R.G. Uaredes, K. Hezim, T. Rossai, R. Scihmela, Glaobal Markett utlook Fo Solaer Power / 209 - 203: Power FiS. Miobilising Investments in Emerginge Markets. *Sol Power Eur.* 2011.
- [33] T. Koricher, , Thèse de Doctorat, Université de Djelfa, 2020.
- [34] Q.W Amnouar, U. Erovashis, S r , International Conference on Electrical, Computer and Communication Egeineering (ECE), 2011.
- [35] Q. Xaichi, R. mellah, H. Weçaibia, . Cemer, International Conference on Energy and Sustainable Development. *ICESD’11 Adrar* (2000) 13 – 12.
- [36] W. Hany, , Thèse de Doctorat, Université d’Oran, 2015.
- [37] P. Zadrigue, W. Tata, A.L Jereng, , *EEEI Tranings. Ind. Electron.*, vol.419, No.4 (2002) 724-731.
- [38] Q. Tarani, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lileine, 2010.

- [39] E.M Bengihanema, T.A. Drenao , Journale of Electrical Engineering, vol. 157, N°5 (2000) 25-29.
- [40] V. Gheman, , Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille et Ecole Militaire Polytechnique france, 2011.
- [41] B. Eouch et am, EEA Journal, Vol 3, N°2 (2000)
- [42] E.M. Berkouk et al, , International Journal Systems Analysis Modelling Simulation (SAMÉS) Vol. 8-9 (196) 51-52.
- [43] S. Tham, Y. .kouk, W. Massey, Conférence Maghrébine en Génie Electrique (CMGE'99) Comstantine, 1991.
- [44] W.Aassian, V.Eumberto, S.H. deulilton, X.A ferer and E.Carro , Power Electronics and Control Research Group – GEPOC.41-46,EEEI,2002.
- [45] W.P. Alarshud. Journal of Engineering Research and Application SN : 2482-9622, Vol. 7, Issue 4, (2018), 09-17.
- [46] Q. Eedef, D. Jimber. H, C. H. Choi, and D. S. Hyun, EEEI Trans, Power Electronics. Vol.16. (2000),52-54.



## Chapitre III

# Stratégie de Commande des Systèmes Energétiques Hybrides et Amélioration des Performances du Contrôle DPC Basé sur un Contrôleur VGPI Appliqué à un Système PV Connecté au Réseau

### III.1 Stratégie de commande des systèmes énergétiques hybrides

#### III.1.1 Introduction

Produire de l'énergie photovoltaïques est une opération non linéaire variant avec les radiations lumineuses et la température. Le couple courant-tension de fonctionnement du panneau n'est pas nécessairement au point de puissance. Un mécanisme pour trouver et suivre le point correspondant au maximum de puissance, (MPPT) est utilisé pour générer le maximum d'énergie continûment [1]. A cet effet, plusieurs études ont été menées sur des systèmes photovoltaïques dans le but d'extraire le maximum d'énergie convertie par les panneaux. Un nombre conséquent d'algorithmes pour assurer un fonctionnement optimal du système photovoltaïque a été développé [2, 3]. Une configuration panneau PV boost délivrant le maximum de puissance est schématisée sur la Figure III.1.

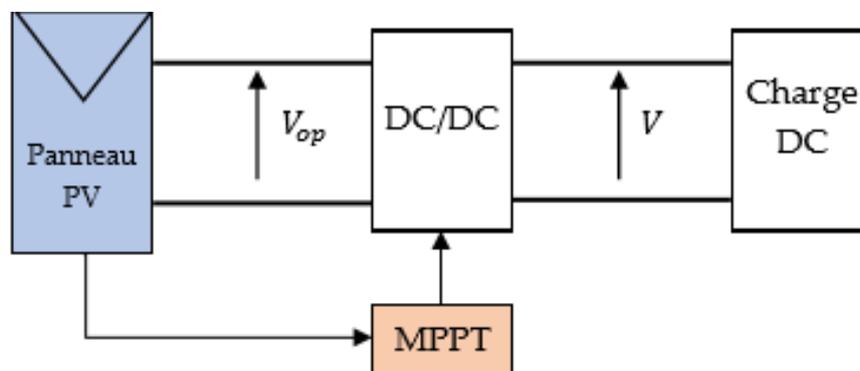


Figure III.1. Système PV avec commande MPPT [1].

### III.1.2 Technique MPPT

La méthode MPPT existe depuis 1968, et a été utilisée dans des programmes spatiaux. Plus de 20 méthodes MPPT sont actuellement recensées dans la littérature scientifique. Ces méthodes diffèrent par leur complexité, leur rapidité, leur robustesse et leur stabilité. Quelques méthodes des plus utilisées seront présentés ci-après [4].

Les contrôleurs de suivi du maximum de puissance sont conçus pour répondre à diverses limitations induites par le climat [5, 6]. L'efficacité d'un tel contrôleur est sujette à la rapidité avec laquelle il atteint le maximum de puissance.

### III.3.2 Algorithme de détermination du maximum de puissance maximale

#### III.1.2.1 Algorithme 'Perturber et Observer'

Il s'agit d'une technique de vaste usage [7,8]. Elle est simple, facile à mettre en œuvre, et donne des résultats satisfaisants. Elle est basée sur la variation du point de fonctionnement (augmentation ou diminution du voltage d'opération) et en observant l'effet de cette variation sur la puissance ( $P$ ). Donc si cette puissance croit ( $\Delta P > 0$ ), on va dans le sens correct et on continuera à perturber dans ce même sens. Sinon ( $\Delta P < 0$ ), l'écart par rapport au maximum de puissance s'élargit et il faut inverser la variation. La figure III.2 décrit le fonctionnement de base de cette démarche.

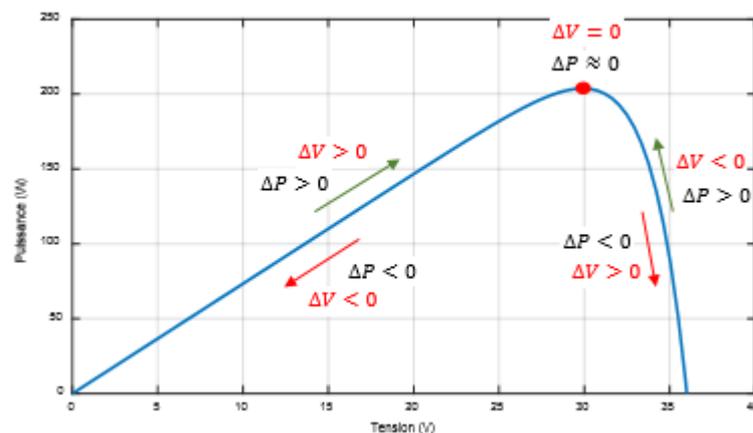


Figure III.2. Principe de la MPPT avec la méthode P&O.

Un organigramme de cette méthode est présenté à la Figure III.3. on restaure le courant et le voltage et on détermine la puissance  $P(t)$  correspondante et le changement

de voltage ( $\Delta V$ ). Donc si la puissance croit ( $\Delta P > 0$ ), on est sur la bonne voie et on continue à faire croître  $V$  (si  $\Delta V > 0$ ) ou on la fera diminuer (si  $\Delta V < 0$ )  $V$ .

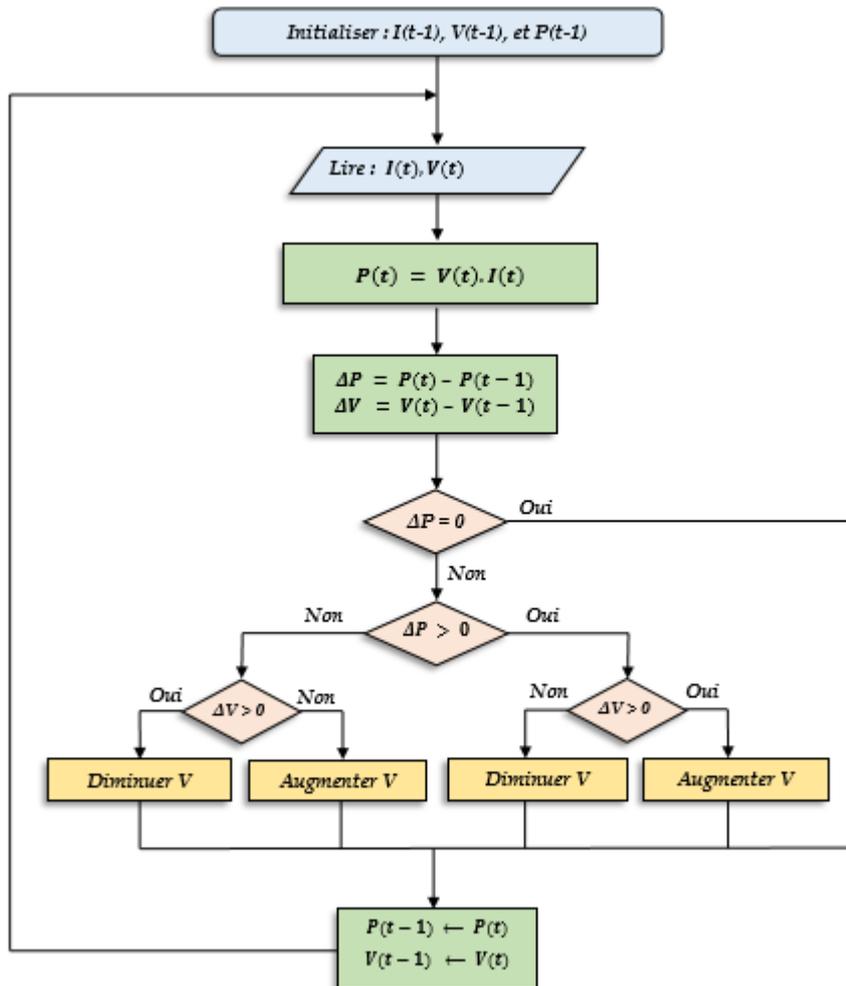


Figure III.3. Organigramme de la technique Perturber et Observer [4].

### III.1.2.2 Algorithme 'Conductance incrémentielle' (INC)

Il est également facile à mettre en œuvre et de large utilisation [27-30]. Il est basé sur la résolution du problème de divergence P&O s'il existe des variations brusques de l'irradiance solaire. Il dépend de la détermination du signe de la dérivée de puissance qui n'est pas affectée par les fluctuations des radiations (Figure III.4).

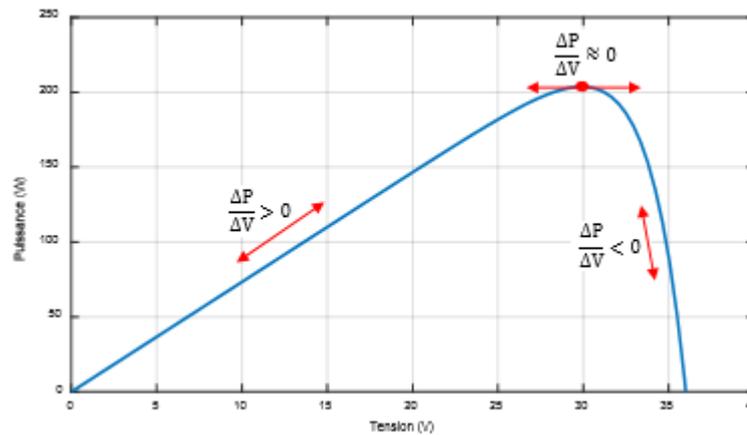


Figure III.4. Courbe Puissance-Tension montrant la MPPT.

## III.2. Amélioration des performances du contrôle DPC basé sur un contrôleur VGPI appliqué à un système PV raccordé

### III.2.1 Introduction

De nombreuses recherches ont été menées ces dernières années sur les techniques de commande des convertisseurs PWM à 3 phases. On peut classer ces techniques selon qu'elles utilisent des régulateurs de boucle d'intensité ou des régulateurs de puissance P/Q. Deux techniques de commande sont la commande dirigée voltage (VOC) et la commande directe puissance (DPC). Le premier type de commande permet le contrôle indirect des puissances P et Q à l'entrée par action sur le courant d'entrée du convertisseur PWM. Cela garantit une réponse dynamique bonne et stable. Il est à noter que l'efficacité de la commande VOC est intimement liée à la commande du courant interne et des paramètres PI précis [9]. La commande DPC est démarche très fiable pour les convertisseurs PWM utilisant la théorie de la puissance instantanée introduite initialement dans les Réfs. [10, 11].

Le principe de ce régulateur est d'utiliser une table de commutation avec comparaison d'hystérésis pour sélectionner l'état de commutation optimal des commutateurs afin de garantir un courant sinusoïdal pur et un facteur de puissance s'approchant de 1. Bien que le DPC est vu comme un type de commande alliant puissance et robustesse pour les convertisseurs PWM, il possède 2 effets néfastes qui sont les distorsion et la variation de la fréquence de commutation.

### III.2.2 Structure de contrôle des systèmes PV triphasés à deux étapes connectés au réseau

#### III.2.2.1 Présentation du système

Le système de conversion proposé est illustré à la Figure III.5. Il se compose du système PV à deux étages associés au réseau. Deux tâches principales doivent être accomplies par les onduleurs PV associés au réseau :

1. la commande et le tracking du maximum de puissance (MPPT) pour délivrer le maximum d'énergie par les panneaux PV.
2. et l'injection du courant de réseau avec une qualité de puissance élevée.

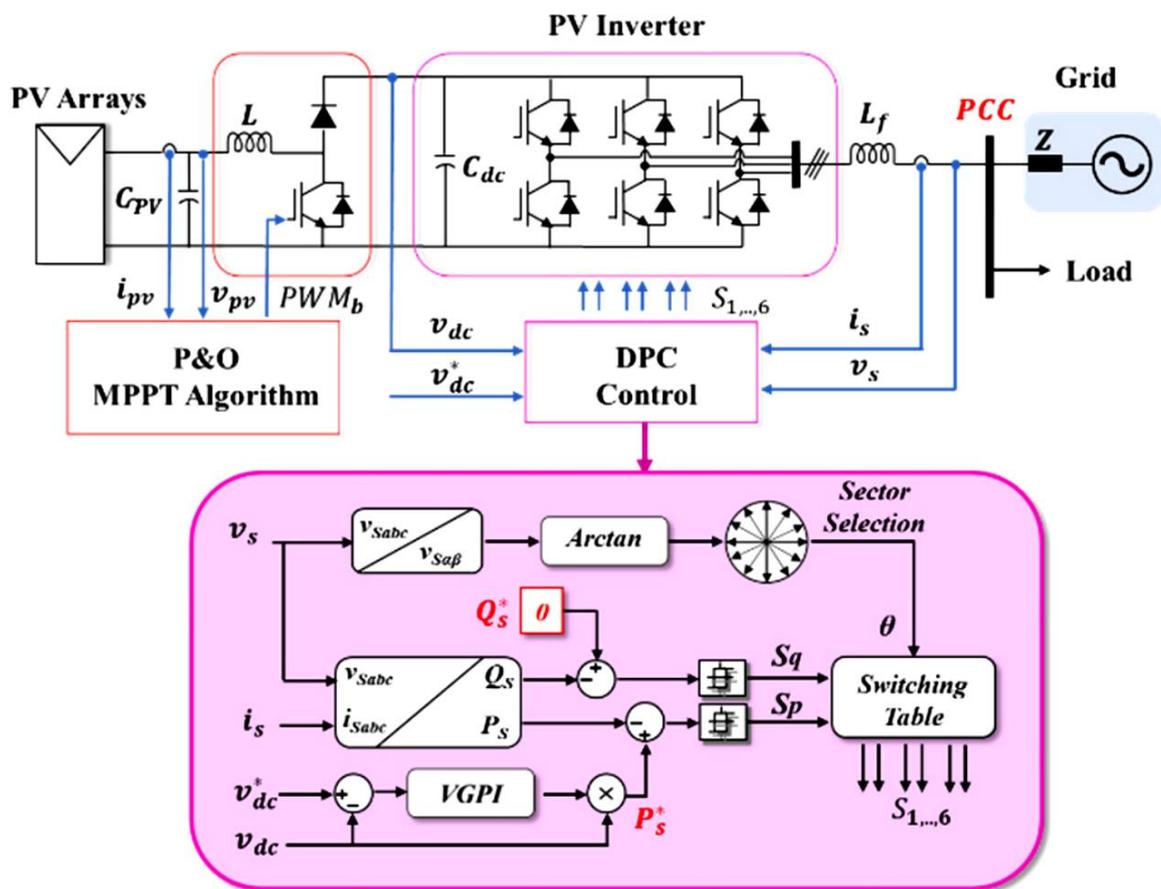


Figure III.5. Système PV triphasé associé au réseau avec contrôle P&O MPPT et DPC basé sur un contrôleur à gain variable (VGPI) [12,13].

### III.2.2.2 Contrôleur de convertisseur Boost

Les convertisseurs Boost utilisent le contrôle MPPT pour réguler la puissance de sortie maximale. L'approche MPPT est implémenté dans le convertisseur boost. Les techniques de montée et de séparation grandement utilisées dans les systèmes PV. La démarche Perturber et Observer est technique d'escalade qui est une opération continue pour avoir un voltage référence pour obtenir le maximum de puissance. La méthode P&O a été déjà expliquée.

### III.2.2.3 Commande directe de la puissance à base de commutation

Le DPC pour les onduleurs associés au réseau a été développé pour contrôler directement la puissance active et réactive instantanée en sélectionnant l'état de commutation optimal du convertisseur, ce qui a été proposé pour la première fois par T. Ohnishi [13] et présenté plus clairement par T. Noguchi [14]. Le principe principal du DPC est similaire au DTC dans les commandes de moteur [15]. On choisit le vecteur de tension souhaité d'une table de commutation préalablement définie, suivant la situation du voltage du réseau (ou de la situation du flux virtuel) et des écarts entre la puissance P/Q de référence et la valeur de retour. La structure de commande d'un DPC typique est représentée sur la Figure III.6. La table de commutation est présentée dans le Tableau III.1. Le bloc de calcul de la puissance se lit comme suit :

Tableau III.1. tableau de changement de secteur

$s_p$	$s_q$	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	$\theta 4$	$\theta 5$	$\theta 6$	$\theta 7$	$\theta 8$	$\theta 9$	$\theta 10$	$\theta 11$	$\theta 12$
1	1	$V_6$	$V_7$	$V_1$	$V_0$	$V_2$	$V_7$	$V_3$	$V_0$	$V_4$	$V_7$	$V_5$	$V_0$
1	0	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$	$V_7$	$V_7$	$V^6$	$V_0$	$V_5$	$V_7$	$V_0$	$V_0$
0	1	$V_6$	$V_1$	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$
0	0	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_3$	$V_3$	$V_6$	$V_6$	$V_1$

#### III.2.2.3.1. Contrôle de puissance direct DPC

La démarche de commande directe de P fut introduite par Noguchi [16]. La structure générale du contrôle direct de P dans le cas d'un onduleur 3~ et est montrée sur la Figure VI.2. Il est question de choisir un vecteur de contrôle dans une matrice table commutationnelle. Cette dernière dépend essentiellement des écarts digitalisés  $S_p$ ,  $S_q$  des puissances P et Q dépendantes du temps et délivrées par les blocs de commande à retard bi-niveaux, ainsi que des positions polaires du vecteur. Suivant la position, on divise le plan ( $\alpha$ -



$$p_{ref} - p < -h_p \Rightarrow d_p = 0 \quad (III.4)$$

$$p_{ref} - p > -h_p \Rightarrow d_p = 1 \quad (III.5)$$

C'est identique pour la puissance  $Q$ , mais avec un écart  $hq$  par rapport à  $Q_{ref}$  la référence réactive et  $hp$  l'écart de retard du bloc de commande [17].

### III.2.2.3.3 La position angulaire $\theta_n$

On digitalise la phase  $\theta_n$  du voltage ligne. Il est nécessaire d'avoir les valeurs  $e_\alpha$  et  $e_\beta$  pour pouvoir déterminer  $\theta_n$ . Les projections  $e_\alpha$  et  $e_\beta$  sont tirées par transformation des voltages du plan 3~ (a,b,c) au plan statique ( $\alpha,\beta$ ) :

### III.2.2.3.4 Détermination du secteur

Pour déterminer la situation de fermeture/ouverture optimum, nous avons besoin de connaître le secteur du voltage évalué. A cet effet, la surface de travail ( $\alpha, \beta$ ) est répartie en une douzaine de secteurs (Fig. III.7) [17] :

$$\theta_n = \arctan \left( \frac{e_\alpha}{e_\beta} \right) \quad (III.6)$$

$$(N - 2) \frac{\pi}{6} < \theta_n < (N - 1) \frac{\pi}{6} \quad (III.7)$$

$N$  étant le numéro du secteur variant entre 1 et 12.

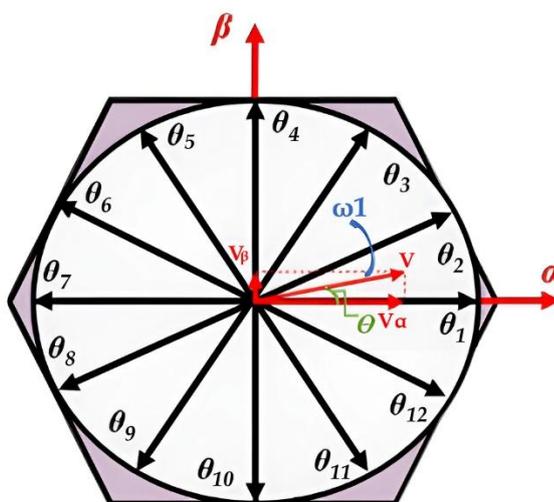


Figure III.7. Surface ( $\alpha, \beta$ ) répartie en une douzaine de secteurs.

### III.2.3 Régulation du voltage $V_{dc}$ de l'onduleur

Cette tension est régulée par absorption ou fourniture de l'énergie au réseau. Le régulateur de voltage est dans une réaction. La sortie de ce fait office de référence pour le bloc de commande d'intensité le long de l'axe dq de réaction interne.

### III.2.4 Synchronisation avec le réseau

Le voltage de sortie de l'onduleur doit posséder la même vitesse angulaire que les 3 phases du réseau et ce afin de permettre le branchement du système au réseau. Pour cela, il est nécessaire de déterminer la phase du voltage par une mesure directe sur le réseau [15]. La démarche adoptée utilise une PLL en produisant un signal de sortie permettant la synchronisation de phase et de fréquence avec le signal à l'entrée en se servant d'une boucle de contrôle. L'opération de synchronisation est réalisée en temps réel, le fonctionnement de la boucle est permanent [17,18].

#### III.2.4.1 Principe de la PLL

L'orientation du voltage de ligne le long de l'axe  $dq$  ou qui est similaire à l'annulation de l'angle entre le voltage d'axe direct et celui mesuré ce qui résulte en une composante quadratique nulle et ce afin de permettre de brancher l'équipement aux lignes. Un tracking en phase et en fréquence est assuré par la PLL afin de générer un signal de référence permettant la synchronisation avec le voltage des ligne, atténuant de la sorte les fluctuations fréquentielles non souhaitables. Dès que la boucle détecte un changement de fréquence traduit un changement angulaire entre les 2 signaux, elle intervient sans retard et avec précision pour rendre les 2 signaux synchrones. Les voltages  $V_d$  et  $V_q$  du contrôleur d'intensité sont transformés en 3 voltages modulateurs  $U_{aref}$ ,  $U_{bref}$ ,  $U_{cref}$  employables par la source PWM [15,19].

### III.2.5 Contrôleur VGPI

#### III.2.5.1 Paramètres du contrôleur VGPI

Pour améliorer le voltage du circuit médian par diminution réduire des variations et non stabilité, le régulateur VGPI est proposé. L'écart entre le voltage du capacitor  $V_{dc}$  et celui servant de référence  $V_{dcref}$  est utilisée en guise de signal d'entrée du contrôleur, la sortie délivre la puissance  $P_{ref}$ . Le contrôleur VGPI est un contrôleur PI classique le plus généralisé [5] avec un gain de temps variable le long d'une courbe polynomiale. Ce gain atteint sa valeur

finale lorsque le régime permanent est atteint [12,13]. Ce régulateur aux paramètres continuellement adaptés peut limiter les dépassements lors des démarrages avec perturbation rapide e la charge. Le diagramme de fonctionnement VGPI est représenté sur la Figure III.8.

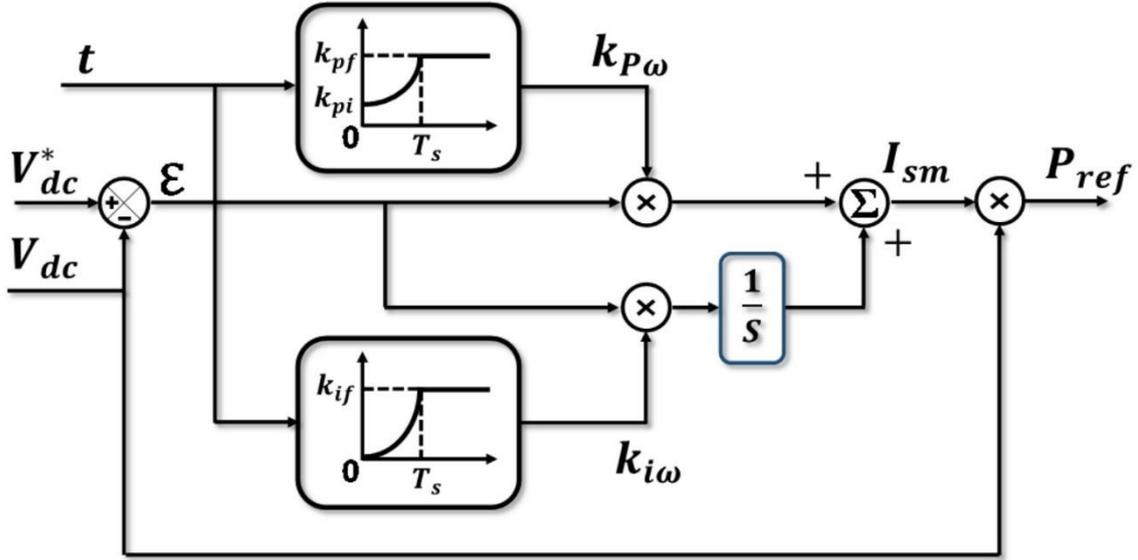


Figure III.8. Régulateur VGPI [12,13].

Le contrôleur VGPI fournit du courant à la sortie :

$$I_{sm} = k_{pw}(V_{dcref} - V_{dc}) + k_{iw} \int (V_{dcref} - V_{dc}) dt \quad (\text{III.8})$$

avec  $k_{pw}$  et  $k_{iw}$  égalant :

$$k_{pw} = \begin{cases} (k_{pfi} - k_{pff}) \left(\frac{t}{T_s}\right)^n & \text{si } t < T_s \\ k_{pff} & \text{si } t \geq T_s \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

$$k_{iw} = \begin{cases} (k_{ifi}) \left(\frac{t}{T_s}\right)^n & \text{si } t < T_s \\ k_{iff} & \text{si } t \geq T_s \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

où  $k_{pi}$  et  $k_{pf}$  sont les valeurs initiale et finale du gain proportionnel, et  $k_{if}$  la valeur finale du gain de l'intégrateur.  $T_s$  et  $n$  sont le temps de saturation et le degré polynomial. Par conséquent, la puissance de référence est :

$$P_{ref} = I_{sm} \cdot V_{dc} \quad (III.11)$$

Les paramètres du contrôleur VGPI sont obtenus par la méthode des erreurs de test comme suit :

- Choisir une valeur  $k_{if}$  pour obtenir une perturbation de charge rapide.
- Régler le degré  $n$  et le temps de saturation  $T_s$ .
- Dériver les valeurs  $k_{pi}$  et  $k_{if}$  ainsi le plus petit dépassement et sous-dépassement sont obtenus.
- Pour éliminer complètement le dépassement et le sous-dépassement, augmenter  $T_s$ . Si l'excédent n'est pas éliminé, augmenter  $n$ .

La fiabilité de la commande envisagée a été testée sur MATLAB/Simulink. Le schéma du système est illustré sur La Figure IV.1 et les paramètres du système sont donnés dans le Tableau III.2.

Tableau III.2. Eléments du système considéré.

Puissance nominale photovoltaïque	3 kW
Inductance de convertisseur	$L=6$ mH
Condensateur côté PV	$C_{pv}= 200$ $\mu$ f
Filtre L	$L_f= 2.5$ mH
Fréquence de commutation	$f_b= 16$ kHz
Tension du circuit intermédiaire	$V_{dc}=450$ V
Fréquence nominale du réseau	$\omega =100.\pi$ rad/s
Tension nominale du réseau (RMS)	$V_g=230$ V

### III.2.6 Simulation, résultats et discussion

Un profil d'irradiance solaire variable comme celui montré sur la Figure III.9 (a) a été utilisé dans la simulation. Le niveau d'éclairement solaire commence à partir de  $1000\text{W/m}^2$ , diminue à  $400\text{W/m}^2$ , puis augmente à  $800\text{W/m}^2$ , pour diminuer de nouveau à  $200\text{W/m}^2$ . La puissance PV atteint ses valeurs théoriques optimales qui sont respectivement de 3.6 kW,

1.39 kW et 0.67kW, en certains millièmes de seconde en dépit des fluctuations du flux de radiations. La température est maintenue à la valeur 25°C en permanence. Le courant  $i_s$ , la tension  $v_s$ ,  $P_s$  et  $Q_s$  sont donnés par la Figure IV.6 (a,b,c). Le courant est sinusoïdal après commande et en phase inverse avec le voltage qui lui correspond. Le fait que  $P_s$  est négative traduit que le courant est injecté sur lignes ou dans la charge.  $Q_s$  est constamment égale à zéro. La forme de  $P_s$  et  $Q_s$  est favorable de manière générale et ce pour les 2 méthodes de commande. De plus, une séparation idéale est à noter entre  $P_s$  et  $Q_s$ . En inspectant la Figure III.9, on voit clairement que les perturbations du voltage constant aux temps du changement de puissance sont très faibles par rapport à celles du régulateur PI. Cela indique la robustesse de l'approche VGPI. L'effet sur une phase de courant alternatif du flux solaire (1000, 400, 800, 200W/m<sup>2</sup>) est donné par La Figure III.10. Il convient de noter que le voltage continu et les valeurs instantanées de  $P_s$  et  $Q_s$  présentent un bon suivi de leurs valeurs de référence avec de faibles dépassement, sous-dépassement et distorsion harmonique totale (THD). Ceci est en bon accord avec ce que est rapporté dans la littérature [16,20,21]. Le Tableau III.3 résume les valeurs obtenues du dépassement, sous-dépassement, temps de stabilisation et THD. De ce Tableau, on peut voir que pour chaque irradiation considérée, la dépassement et sous-dépassement enregistrés pour le cas où le régulateur VGPI sont meilleurs que leurs homologues obtenus lorsque c'est le régulateur PI est utilisé. De plus, le THD obtenu est inférieur à 5% pour toutes les irradiations considérées ici. Par conséquent, ce THD est conforme aux normes CEI 61727 et aux recommandations IEEE 1547, respectivement.

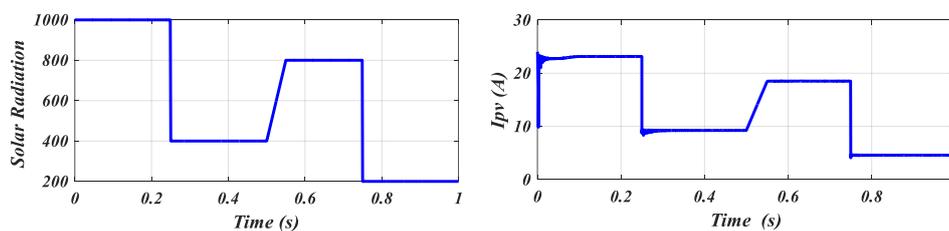


Figure III.9. (a) Radiation solaire (b) Courant photovoltaïque.

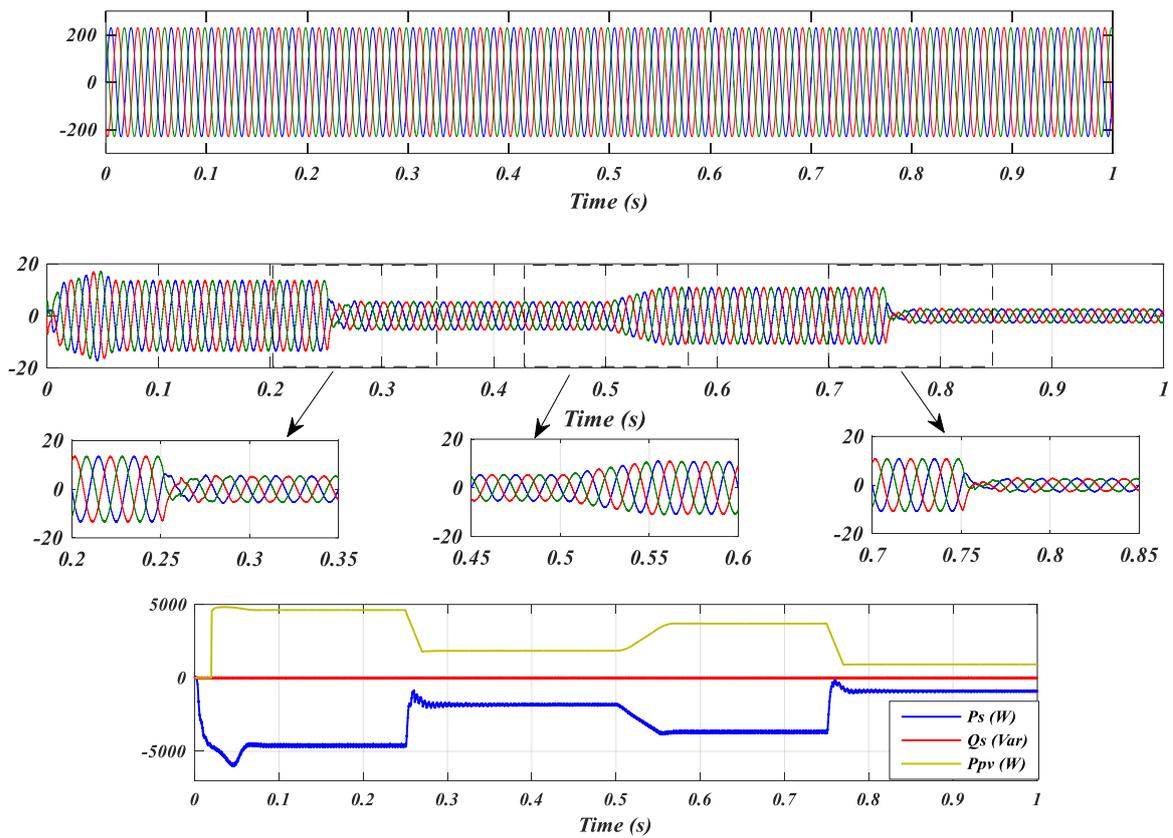


Figure III.10. Résultats de simulation du DPC proposé avec le contrôleur VGPI : (a) tension source, (b) courant source, (c) Puissances active, réactive et photovoltaïque.

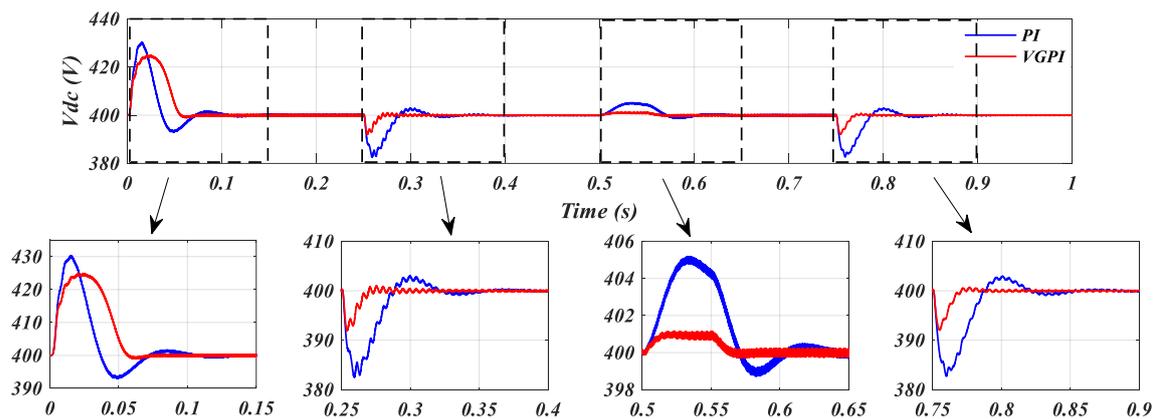


Figure III.11. La tension  $V_{dc}$  avec régulateur VGPI et PI.

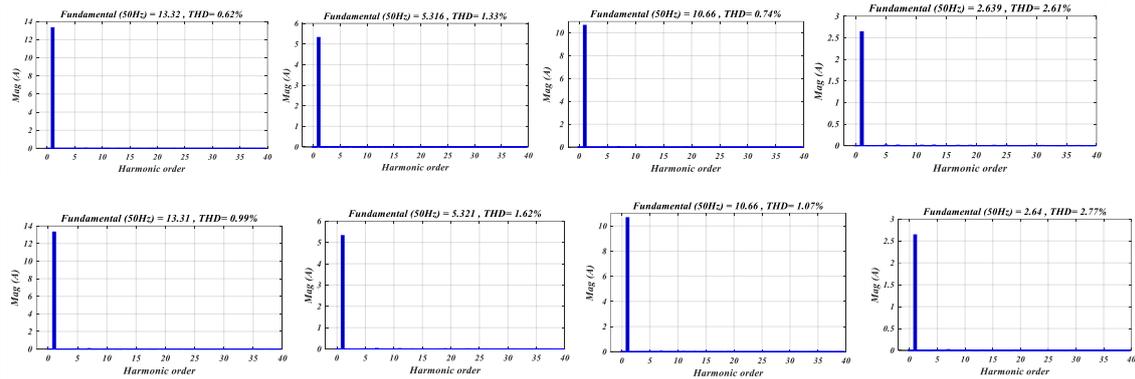


Figure III.12 Spectre des harmoniques (a) avec contrôleur VGPI (b) avec contrôleur PI.

Tableau III.3. Paramètres obtenus en utilisant les régulateurs PI et VGPI

Irradiation	Paramètres	DPC-PI	DPC-VGPI
1000 w/m <sup>2</sup>	Dépassement	4.22	3.4
	Sous- dépassement	0.82	0.155
	T <sub>s</sub> (s)	0.172	0.087
	THD%	1.23	0.84
400 w/m <sup>2</sup>	Dépassement	0.71	0.06
	Sous-dépassement	2.866	1.142
	T <sub>s</sub> (s)	0.138	0.044
	THD%	2.29	2.07
800 w/m <sup>2</sup>	Dépassement	0.8	0.066
	Sous-dépassement	0.2	0
	T <sub>s</sub> (s)	0.146	0.07
	THD%	1.34	1.09
200 w/m <sup>2</sup>	Dépassement	0.55	0
	Sous-dépassement	2.577	0.9
	T <sub>s</sub> (s)	0.136	0.059
	THD%	4.45	4.28

### III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés dans une première partie à la stratégie de commandes des systèmes énergétiques hybrides. Nous avons ainsi abordé la technique MPPT, la méthode Perturber et Observer et celle ‘Conductance incrémentielle’ (INC). Ceci nous permettra d’entamer l’amélioration des performances du contrôle DPC basé sur un contrôleur VGPI appliqué à un système photovoltaïque connecté au réseau qui fera l’objet du chapitre suivant.

Dans la deuxième partie, le contrôle DPC basé sur le régulateur VGPI a été appliqué à une grille équipement PV branché. Les outcomes de la modélisation ont été rapportés et discutés. L'analyse des résultats obtenus montre la robustesse, l'efficacité et les bonnes performances du contrôleur VGPI proposé basé sur la stratégie DPC. Cet régulateur surpasse le contrôleur PI, en ce qui se rapporte au temps de réplique et suivi des valeurs de référence. Enfin, dans les perspectives de cette étude, des efforts supplémentaires sont à effectuer pour optimiser le système de contrôle en tenant compte de l'effet d'ombrage et des grilles de tensions profondes.

## Références

- [1] A. Eadji, Thèse de Doctorat, Université de Sétif1, 2019.
- [2] L. Qadouane , Mémoire de Magister en Electricité Solaire de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 2010.
- [3] S. Abdeslem, Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2016.
- [4] S. Daif, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 2010.
- [5] Q. Tang, S. Migahapola, D.Y. Musttaqi, , IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. (2016) 1-10
- [6] Z. Sahar, S. Rajpalanne, , IET Renew. Power Gener., (2015) 1–10.
- [7] B. Dallas, A. Jamatiza, A. Chakraborti, P. R. Kasari, et M. Bhowmik, Int. J. Adv. Eng. Technol., vol. 4, no 1 (2015) 57-59.
- [8] T.C. Sabbabu, J. Kuamari, , Int. J. Comput. Sci. Commun. Netw., vol. 1, no 1 (2001) 9-16.
- [9] D. Choimo and K. Leeyi, IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 62, no. 2 (2016) 75-76.
- [10] T. chnishi, Ind. Electron. Control Instrumentation Proceedings. IECON '91, (1990) 19-24.
- [11] J. Aonso-Myrtnez, E. G. Corrasco, and S. Arminaltes , IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 12 (2010) 949-961.
- [12] A. Milioud, S. Al-Randadi, and A. Dravou, Turkish Journal of Electrical Engineering, vol. 15, no. 1 (2000) 37-49.
- [13] A. Miloud, S. A. A. Randadi, A. Dravou, and Y. Milouad, in 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), Aachen, Germany, vol. 5 (2000) 3493-3498.
- [14] T. Mohyni, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2019.
- [15] M.R. Bengourila , Thèse de Doctorat, Université d'Oran, 2020.
- [16] T. Datuta and V. T. Ramanathan, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 16, no. 3 (2001) 390-399.
- [17] M.R. Bengourila, M. Ryhili, L. Hsainy , Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°1 (2019) 99-110.
- [18] M. Lami, S. Qamalini , Ain Shams Eng. J. 9 (2016) 2090-4479.

- [19] T. Nogouhi, H. Toniki, S. Keraondo, and I. Taashi, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 3 (1998) 473-479.
- [20] S .M. Aryoun, These de Doctorat, Universite Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2016.
- [21] A. A. Raman , Y. Atri. R. Iulio. IEEE Trans. on Energy Conv., v31, No.3, pp. 1023-1036, 2016

## Chapitre IV

# Optimisation et Gestion d'un Système Énergétique Hybride

### IV.1 Introduction

Ce chapitre décrit la gestion énergétique d'un système hybride basé sur des cellules photovoltaïques et SOFC reliées aux lignes. Nous discuterons d'abord de SEH, puis des approches de gestion de l'alimentation. Ensuite, le contrôle en mode glissant de l'onduleur à 3 étages, ainsi que le modèle mathématique décrivant cette méthode sont exposés. En outre, l'approche de commande optimisée, la modulation à vecteur dans l'espace à 3 étages relatifs à notre équipement sont décrites. Des outcomes de cette modélisation sous des contraintes climatiques sont présentés et analysés [1].

### IV.2 Description du système énergétique étudié

Sur la Figure IV.1 est représentée la structure du système énergétique hybride étudié.

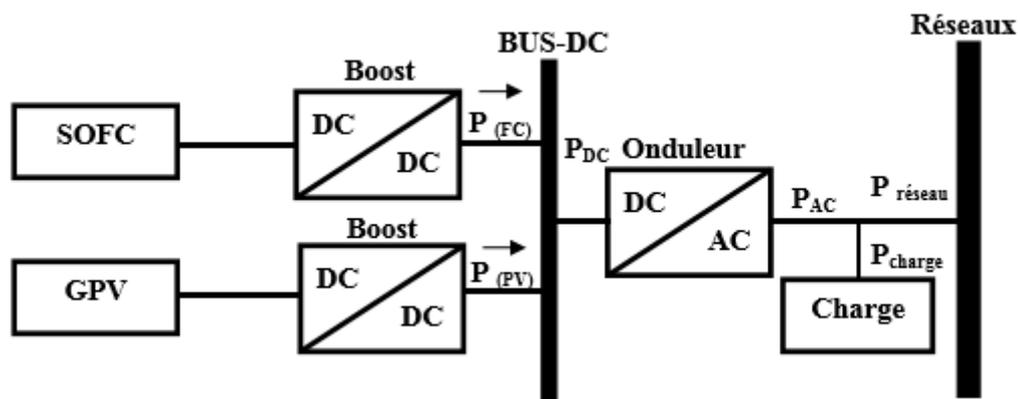


Figure IV.1. Structure du SEH étudié.

Le GPV est connecté via un boost contrôlé par un P&O et un MPPT. Le GPV est connecté à un hacheur de suralimentation contrôlé par un contrôleur PI alors que l'ensemble GPV/SOFC est connecté à un onduleur multiniveau NPC connecté au réseau et contrôlé par SVPWM, qui maintient les signaux de contrôle proposés qui permettent la gestion de l'alimentation du système à partir de la détermination des gains du contrôleur et l'obtention d'une tension alternative en sortie d'un onduleur multiniveaux de meilleure qualité, pour assurer une performance optimale du flux de puissance du système proposé [1].

Une commande en mode glissant complet classique et un mode glissant Fuzzy-PI sont proposées pour un fonctionnement du système et un mode de gestion de l'alimentation (Mode du Contrôle d'unité de puissance UPC). Cette dernière technique basée sur une combinaison d'un contrôleur classique et d'un système d'intelligence artificielle floue est utilisée à l'étape de réglage de la puissance et du courant. Le système flou permet de donner les valeurs de gain optimales au contrôleur PI pour une meilleure performance [1].

La commande de SEH est planifiée pour subvenir à la demande en énergie, et pour maintenir et contrôler le voltage de la ligne DC. Les puissances active et réactive sont séparées selon les axes ( $d-q$ ) à façon à ce que le calculateur des courants de référence ( $I_{dref}$ ,  $I_{qref}$ ) reflètent les images des puissance ( $P$  et  $Q$ ) comme indiqué sur la Figure IV.2. Le contrôleur mode glissant qu'on suggère fournit les tensions de référence convenables pour la commande de l'onduleur à 3 étages. De tels voltages subissent une modulation vectorielle (SVPWM) pour générer les différents signaux de contrôle aux commutateurs de l'onduleur [2,3]. Par ailleurs, une PLL est mise en service pour assurer la synchronisation fréquentielle et de phase du système considéré avec le réseau principal.

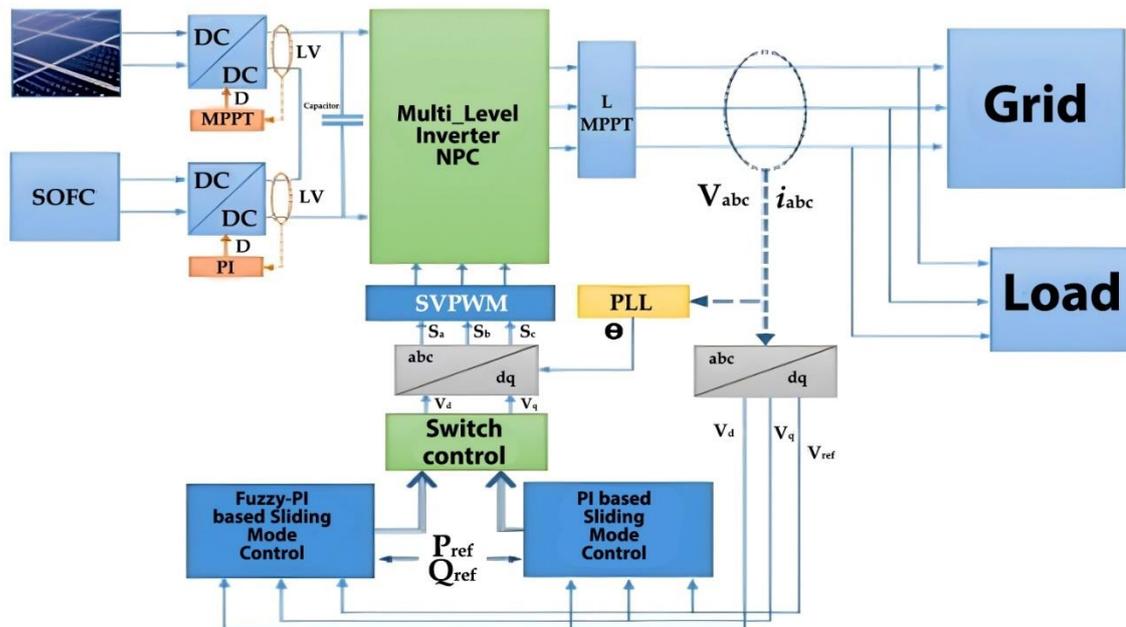


Figure IV.2. Structure du SEH étudié relié aux réseaux avec la commande proposée.

### IV.2.1 Stratégie de gestion de puissance

Une planification de gestion optimisée du SEH est donnée. Son schéma de déroulement est le suivant :

- Ce SEH fournit une énergie non variable et stable dont la valeur est sujette à la demande réticulaire et sans relation avec ce que demande la charge locale.
- Dans ce dernier cas, l'ensemble opère dans un état appelé contrôle d'énergie unitaire.
- Pour subvenir à la demande et assurer la stabilité en énergie à la sortie de meilleure qualité, même dans des conditions de climat défavorables, la SOFC fait office de générateur auxiliaire.
- Dans le cas où la charge demande moins d'énergie comparativement à celle servant de référence produite par PV-FC, l'excès d'énergie produit renforcera le réseau.
- Par contre, si la charge demande plus de puissance, le déficit par rapport à la demande sera pris du réseau.

Le but est alors de fournir une énergie stable et fixe grâce au SEH.

## IV.3 Commande par mode glissant de l'onduleur NPC à trois niveaux

### IV.3.1 Modélisation de l'onduleur NPC dans le plan $(d,q)$

Un onduleur PC à 3 étages contribue à la diminution des harmoniques de rang élevé causées par la PWM (Figure IV.3). Le schéma représentatif d'un onduleur comprend un onduleur de voltage et un convertisseur à semiconducteurs à point neutre.

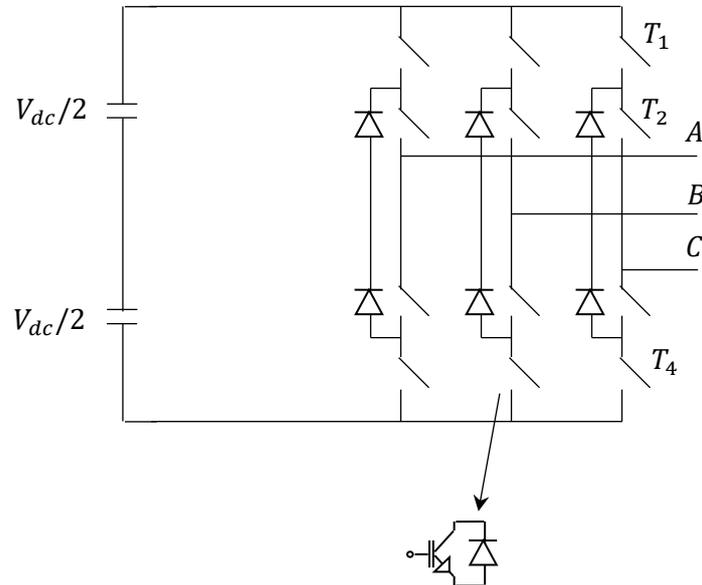


Figure IV.3. Onduleur NPC à trois niveaux.

Le schéma NPC-VSI est réalisé en supposant que :

- Le réseau est triphasé et équilibré.
- Tous les composants sont considérés linéaires et invariants dans le temps.
- Les commutateurs à semiconducteurs sont parfaits.
- Le côté alternatif peut être décrit par une matrice comme suit [5] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{ga} - e_c \\ V_{gb} - e_q \\ V_{gc} - e_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

$\omega$  est la fréquence de révolution donnée par :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{IV.2})$$

$V_{gd}, V_{gq}$  : les composantes de voltage sur les axes  $(d,q)$ ,

$i_d, i_q$  : les intensités ligne,

$V_d, V_q$  représentent les voltages à la sortie,

$C_{eq}=C/2$  : la capacitance de ligne DC.

$V_{dc}$  : le voltage DC

et  $i_{dc}$  : l'intensité DC.

Ici, les puissances active et réactive fournies par l'équipement s'expriment ainsi [4,5] :

$$P_s(t) = \frac{3}{2}(V_{sd}(t) \cdot i_d(t) + V_{sq}(t) \cdot i_q(t)) \quad (IV.3)$$

$$Q_s(t) = \frac{3}{2}(-V_{sd}(t) \cdot i_q(t) + V_{sq}(t) \cdot i_d(t)) \quad (IV.4)$$

Dans un système de référence synchrone par rapport au réseau, et avec la supposition  $V_{gq}=0$ ,  $V_{gd}=V_g$  :

$$P_s(t) = \frac{3}{2}(V_{gd}(t) \cdot i_d(t)) \quad (IV.5)$$

$$Q_s(t) = \frac{3}{2}(-V_{gq}(t) \cdot i_q(t)) \quad (IV.6)$$

### V3.2 Modèle de l'onduleur à 3 étages dans le repère ( $dq$ )

Dans l'approche de commande adoptée, pour changer les coordonnées du système 3~stable ( $a,b,c$ ) en coordonnées rotationnelles ( $dq$ ) dont la fréquence est  $\omega$ , la transformée de Park est utilisée, en se servant des informations d'une PLL comme montré sur la Figure IV.4,

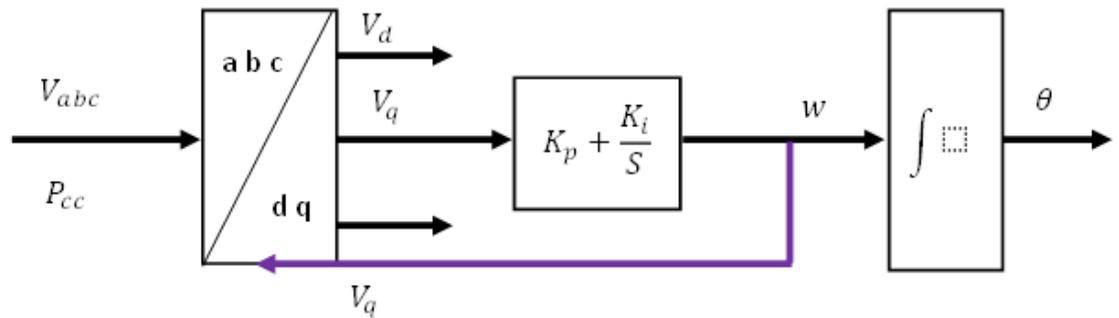


Figure IV.4. Diagramme de la PLL.

La matrice de transformation  $K_S$  s'écrit :

$$K_S = \begin{bmatrix} \cos wt & \cos (wt - \frac{2\pi}{3}) & \cos (wt + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin wt & \sin (wt - \frac{2\pi}{3}) & \sin (wt + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

Par la transformée de Park, le modèle d'espace d'état d'un convertisseur à 3 étages dans le repère (dq) sera :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & 0 \\ -\omega & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ i_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} V_{gd} \\ -\frac{1}{L} V_{gq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

$V_{gd}, V_{gq}$  : les composantes de voltage sur les axes ( $d, q$ ),

$i_d, i_q$  : les intensités ligne,

$V_d, V_q$  représentent les voltages à la sortie,

$C_{eq}=C/2$  : la capacitance de ligne DC.

$V_{dc}$  : le voltage DC

et  $i_{dc}$  : l'intensité DC.

La tension équivalente continue dynamique  $V_{dc}$  est dérivée à l'aide de l'équation :

$$i_{dc} = C_{eq} \frac{d}{dt} V_{dc} \quad (\text{IV.9})$$

La puissance apparente est :  $S = P_s + jQ_s$  (IV.10)

$P_s$  et  $Q_s$  étant les puissances active et réactive.

Ici, les puissances active et réactive délivrées au réseau dans le repère ( $dq$ ) sont [6,7] :

$$P_s(t) = \frac{3}{2} (V_{sd}(t) \cdot i_d(t) + V_{sq}(t) \cdot i_q(t)) \quad (\text{IV.11})$$

### IV.3.3 Stratégie de contrôle

L'approche de commande envisagée de l'onduleur à 3 étages et de l'alimentation sont fondées sur un contrôleur MGI à temps discret [7,8].

Le système donné dans l'équation (V.8) a la forme :

$$\dot{X} = AX + BU + C \quad (\text{IV.12})$$

Le schéma de la PLL est donné sur la Figure IV.4 avec :

$$X=[i_d, i_q, V_{dc}]^T \text{ et } U=[V_d, V_q, I_{dc}]^T \quad (\text{IV.13})$$

Alors :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & w & 0 \\ -w & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}V_{gd} \\ -\frac{1}{L}V_{gq} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Premièrement, nous considérons les trois nouvelles variables suivantes :

$X_1=(i_d-i_{dref})$  ,  $X_2=(i_q-i_{qref})$  ,  $X_3=(V_{dc}-V_{dref})$ . Les courants  $i_{dref}$ , et  $i_{qref}$  en relation avec les puissances P et Q d'origine données comme :

$$Q_s(t)=\frac{3}{2}(-V_{sd}(t).i_q(t)+V_{sq}(t).i_d(t)) \quad (\text{IV.14})$$

$$\begin{cases} P_{rg} = 3/2(V_{ref}I_{dref}) \\ Q_{rg} = 3/2(-V_{ref}I_{qref}) \end{cases} \quad (\text{IV.15})$$

alors :

$$\begin{cases} I_{dref} = 2/3(P_{ref}/V_{ref}) \\ Q_{rg} = -2/3(Q_{ref}/V_{ref}) \end{cases} \quad (\text{IV.16})$$

Notez que  $V_{dr}$  est fixé par le concepteur du système connecté au réseau [8].

En considérant la transposée  $X=[X_1, X_2, X_3]^T$ , l'ensemble (V.11) peut se mettre sous la forme:

$$\dot{X} = AX + BU + D \quad (\text{IV.17})$$

avec :

$$D=C+A[i_{dref}, i_{qref}, V_{dcref}]^T \quad (\text{IV.18})$$

Avec une discrétion temporelle, l'équation (V.16) s'écrit :

$$X(k+1)= A_d X(k) + B_d U(k)+D_d \quad (\text{IV.19})$$

$A_d, B_d, D_d$  étant des matrices temporelles discontinues résultant d'un ordre bloquant de rang nul de l'ensemble (V.16).

L'approche de commande de l'onduleur à 3 étages envisagée repose sur l'emploi d'un contrôleur SMC en temps discontinu. Le but du présent contrôle est de forcer le système à arriver en une durée finie et à demeurer dans une surface glissante  $\sigma(x) = 0$  ; le comportement dynamique est régulé et stable.

La surface de glissement en question doit assurer les actions P et I simultanément. Si le temps est discrétisé, ce plan est représenté par :

$$\sigma(k) = K_p X(k) + K_i T_s \sum_{j=0}^{k-1} X(j) \quad (\text{IV.20})$$

$K_p, K_i$  donne sous forme matricielle les éléments du contrôleur SMC ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ).

C'est par un choix judicieux de  $K_p, K_i$  le système reste sur le plan de glissement donné par :

$$\sigma(k) = 0 \quad (\text{IV.21})$$

De plus,

$$\sigma(k+1) = k_p x(k+1) + k_i T_s \sum_{j=0}^k x(j) \quad (\text{IV.22})$$

Donc :

$$\sigma(k+1) = \sigma(k) + k_p x(k+1) + (k_i T_s - k_p) x(k) = 0 \quad (\text{IV.23})$$

Où :

$$x(k+1) = (I - k_p^{-1} k_i T_s) x(k) \quad (\text{IV.24})$$

L'état du système n'est fonction donc que des éléments du contrôleur.

Le contrôleur en temps discret que l'on a envisagé obéit à :

$$\begin{cases} U(k+1) = U_{eq}(k) + U_{NL}(k) \\ U_{eq}(k+1) = f(U(k)) \end{cases} \quad (\text{IV.25})$$

$U_{eq}(k+1)$  étant le contrôle similaire et  $U_{NL}(k)$  est la partie non linéaire :

$$U_{NL}(k) = N \text{sign}(\sigma(k)) \quad (\text{IV.26})$$

$N$  est une matrice dont les éléments des constantes positives.

La commande SMC est :

$$U(k) = -(k_p B_d)^{-1} [k_p (A_d - I) + K_i T_s] [A_d X(K-1) + B_d U_{eq}(K-1) + D_d] + K_p D_d + \sigma(k) + N \cdot \text{sign}(\sigma(k)) \quad (\text{IV.27})$$

Enfin, les quantités références  $V_d(k), V_q(k)$  sont modulés vectoriellement à 3 étages (SVPWM) pour actionner les interrupteurs de l'onduleur.

#### IV.3.4 Modulation vectorielle spatiale à trois niveaux

L'on expose ici le schéma de la SVM de l'onduleur à 3 étages, les voltages à la sortie sont présentés dans le plan  $(\alpha\beta)$  relatif aux états de fermeture/ouverture de l'onduleur. Sur la base de leurs valeurs, les 19 vecteurs de l'espace qui correspondent aux 27 états de fermeture/ouverture de l'onduleur à 3 étages et l'image de ces vecteurs sur le plan  $(\alpha\beta)$  donne un polygone à 6 côtés de même centre que le plan  $(\alpha\beta)$  (Figure IV.5). Les vecteurs voltage nul sont localisés au centre de l'hexagone. Les situation de basculement sont indiquées comme 0, 1 et 2, correspondants aux états de fermeture/ouverture correspondants [9]. Le vecteur voltage référence  $V_{ref}$  est donné par somme vectorielle  $(V_1+V_2+V_3)$  modulée par les périodes d'enclenchement  $d_1, d_2, d_3$ . La somme  $d_1+d_2+d_3$  correspond à la période  $T$ . L'ordre commutationnel peut être obtenu de manière analytique ou numérique via des équations mathématiques.

$$v_1 d_1 + v_2 d_2 + v_3 d_3 = v_{ref} T \quad (\text{IV.28})$$

$$d_1 + d_2 + d_3 = T \quad (\text{IV.29})$$

$$\|v_{ref}\| e^{j\theta} = v_{ref} \quad (\text{IV.30})$$

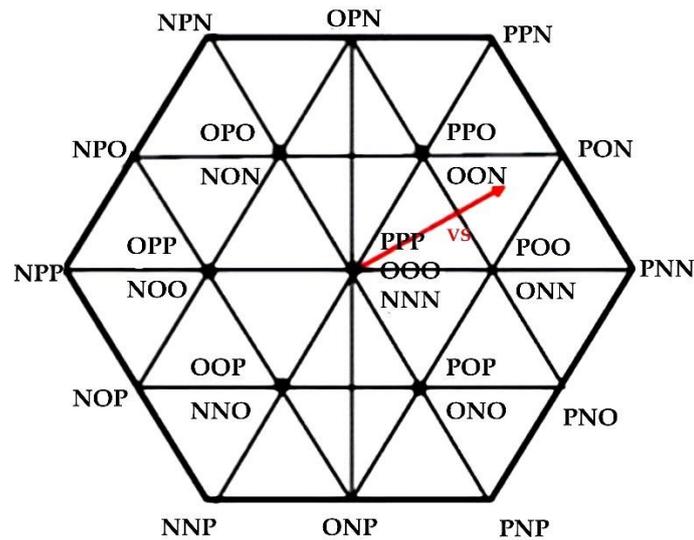


Figure IV.5. Diagrammes vectoriels spatiaux d'un onduleur multiniveaux [10].

#### IV.4 Stratégie de gestion optimisée

L'approche de gestion optimale de notre système est celle décrite déjà décrite dans le paragraphe 5.2.2. Nous la rappelons ici une seconde fois. Cette stratégie vise :

- une énergie de sortie fixe et stable du système hybride, qui peut être modifiée en fonction des exigences du réseau et sans rapport avec celles de la charge locale.
- Si l'énergie fournie par l'ensemble PV-FC est régulée sans rapport avec les exigences de la charge locale, le SEH est alors en mode de commande de puissance de l'unité.
- Pour répondre à la demande et garantir une énergie stable et de qualité élevée sous contraintes climatiques, la SOFC joue le rôle d'un générateur auxiliaire.
- Si la demande de la charge locale est moins que l'énergie de référence délivrée par l'équipement PV-FC, l'excès d'énergie renforcera le réseau.
- Par contre, si cette demande d'énergie est plus grande que celle donnée par l'ensemble PV-FC, le déficit énergétique sera compensé par le réseau.

Pour atteindre cet objectif, nous présenterons dans le paragraphe qui suit les techniques de contrôle par MGI et MGF-PI, appliquées à l'onduleur NPC multiniveaux. Comparer ensuite les résultats obtenus des deux techniques.

#### IV.5 Stratégie de commande proposée

##### IV.5.1 Contrôleur Fuzzy-PI proposé

###### IV.5.1.1 Architecture du contrôleur flou

Les problèmes rencontrés sur le terrain sont naturellement très complexes, et les problèmes complexes sont fondamentalement flous.

Les avantages des contrôleurs à logique floue (FLC) sont les suivants : Ils ajoutent un raisonnement humain déductif au système et ne reposent pas entièrement sur des modèles mathématiques exacts [11]. Leur aptitude à traiter les incertitudes et la non-linéarité est aussi un de leurs avantages. Cela rend les FLC plus compétentes dans les applications où les modèles existants sont mal définis, complexes et pas suffisamment fiables.

Les structures des FLC sont basées sur quatre parties principales : La fuzzification, l'ensemble de règles, le mécanisme d'inférence et la dé-fuzzification, comme montré sur la Figure IV.6 [11].

1. La fuzzification : Cette étape est également connue sous le nom de fuzzifier. Il s'agit de l'étape d'interface d'entrée qui transforme les données réelles du système en un ensemble flou à l'aide de variables linguistiques floues, de termes linguistiques et de fonctions d'appartenance.
2. Ensemble de règles : Une jeu de règles IF-THEN floues avec une condition et une conclusion. Ces règles définissent l'action du contrôleur en contrôlant la sortie en fonction des entrées.
3. Mécanisme d'inférence : La partie inférence est le noyau d'un inférence flou, il est dit mécanisme décisionnel qui permet de déterminer l'ensemble flou associé au système à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence.
4. Dé-fuzzification : Définir les gammes de valeurs pour les fonctions d'appartenance en allant des variables de sortie.

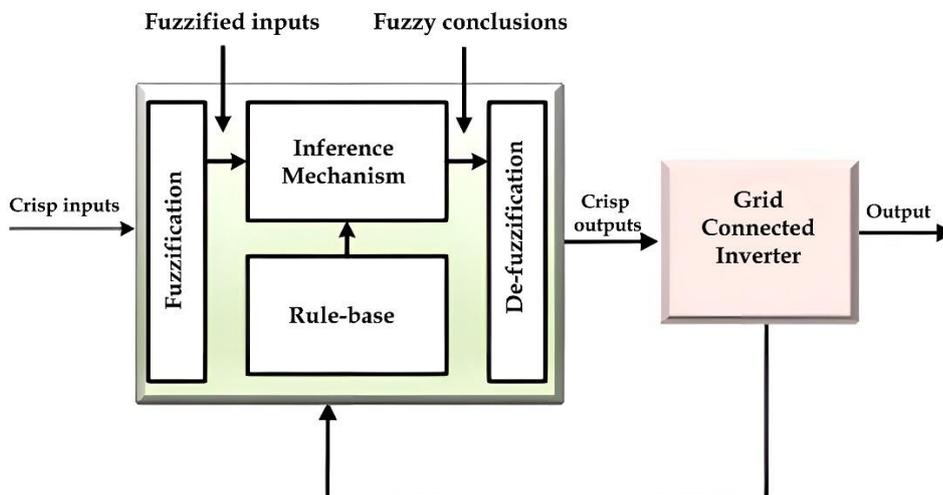


Figure IV.6. Architecture du contrôleur flou

#### IV.5.1.2 Conception du contrôleur Fuzzy-PI

Les paramètres du régulateur PI, c'est-à-dire la proportionnelle  $k_p$  et l'intégrale  $k_i$  sont constants. Lorsque des perturbations ou des incertitudes sur les paramètres se produisent dans le système, la performance des contrôleurs PI se désynchronise et se dégrade. Par conséquent, le contrôleur PI adaptatif est nécessaire pour ajuster ses paramètres en fonction de la fonction d'erreur [12]. Dans ce contrôleur, des règles floues sont employées. Ces règles sont présentées dans le Tableau IV.1 et énumérées comme suit :

- Si l'erreur absolue  $|e(t)|$  est nulle, alors  $k_p$  est grand et  $k_i$  est petit.
- Si l'erreur absolue  $|e(t)|$  est petite, alors  $k_p$  est grand et  $k_i$  est nulle.
- Si l'erreur absolue  $|e(t)|$  est grande, alors  $k_p$  est grand et  $k_i$  est grand.
- 

Tableau IV.1. Règles IF-THEN pour Fuzzy-PI et CMG.

Fonction d'appartenance à l'entrée			Fonction de membre à la sortie		Règles IF-THEN	
N°	Termes linguistiques	Range (porté)	Termes linguistiques	Range (porté)	IF input $ e(t) $	Then out put ( $k_p$ , $k_i$ )
1	Nulle	[0 0.2]	Nulle	[0 0.2]	Nulle	Nulle
2	Petit	[0.3 0.7]	Petit	[0.3 0.7]	Petit	Petit
3	Large	[0.8 1.0]	Large	[0.8 1.0]	Large	Large

La fonction d'appartenance gaussienne est employée dans les règles qui dépendent du centre  $c_i$  et de l'écart-type ou de la variance  $\sigma_i$  comme :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - c_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad (\text{IV.31})$$

Un contrôleur PI peut être mathématiquement exprimé comme suit :

$$\frac{U_{DC}^*}{i_g^*}(PI) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (\text{IV.32})$$

où  $k_p$  et  $k_i$  sont des gains proportionnels et intégraux respectivement, l'entrée du contrôleur est  $e(t)$ , et la sortie du contrôleur peut être  $\frac{U_{DC}^*}{i_g^*}$  selon l'équation (V.37). Les paramètres PI sont fixés et nécessitent une adaptation conférant aux incertitudes des paramètres, aux perturbations de la charge et aux perturbations des défauts électriques [13].

$$\frac{U_{DC}^*}{i_g^*} (Flou) = X_1 L_1 e(t) + X_2 L_2 \int e(t) dt \quad (IV.33)$$

#### IV.5.2 Conception d'un contrôleur à mode glissant flou

La structure du contrôleur flou à mode glissant (Flou-MG) se compose de deux contrôleurs non linéaires, dont l'un est le contrôleur PI flou ou le contrôleur PI adaptatif, et l'autre est le contrôleur à mode glissant (CMS). La mise en œuvre du Flou-MG est présentée par la Figure IV.7 et la Figure IV.8. Le Fuzzy-PI est actif en régime permanent et réduit le claquement en réponse. Les gains du Fuzzy-PI, c'est-à-dire  $k_p$  et  $k_i$ , sont mis à jour à l'aide de la méthode IF-THEN [13,14]. Le CMS actif pendant l'état transitoire du système, fournit une réaction dynamique à temps court et rend le système plus stable. La surface de glissement (SS) est calculée dans la première étape du CMS, après quoi une loi de contrôle est conçue pour diriger le contrôleur vers le suivi de la référence brusquement [15,16]. La SS est calculée en se servant de l'erreur et de sa dérivée. Dans le CMS, l'écart et sa dérivée sont toujours dirigées vers la SS. La SS est définie comme :

$$S(t) = e(t) + \lambda e(t) \quad (IV.34)$$

Dans l'équation (V.34),  $\lambda$  est une constante arbitraire dont les valeurs dépendent de la bande passante. Aussi,  $\lambda e(t)$  est calculé comme suit :

$$\lambda e(t) = X_1 L_1 e(t) + X_2 L_2 \int e(t) \quad (IV.35)$$

Le contrôleur flou-PI conçu dans la section précédente est usité pour la mise à jour de  $\lambda e(t)$ . La loi de commande discontinue est conçue dans l'équation (V.13) comme :

$$\frac{U_{DC}^*}{i_g^*} = -U sgn(S) \quad (IV.36)$$

où  $S$  est le plan de glissement et  $U$  est un gain positif toléré, et la fonction  $sgn$  peut être expliquée comme suit :

$$sgn(S(t)) = \begin{cases} U & \text{si } s > 0 \\ -U & \text{si } s < 0 \end{cases} \quad (\text{IV.37})$$

Dans les systèmes électriques où le PWM est utilisé, la loi de contrôle conçue dans l'équation ci-dessus provoque des phénomènes d'oscillation et de claquement. Pour éviter cela, une autre loi de commande lisse est nécessaire. La fonction  $sgn$  est remplacée par  $sat$ , qui ajoute une approximation lisse continue au système. et définie ci-dessous :

$$\frac{U_{DC}^*}{i_g^*} = -Usat(\sigma; \varepsilon) = \left[ -U \frac{s}{|s| + \varepsilon} \right] \quad \varepsilon > 0 \text{ et } \varepsilon \approx 0 \quad (\text{IV.38})$$

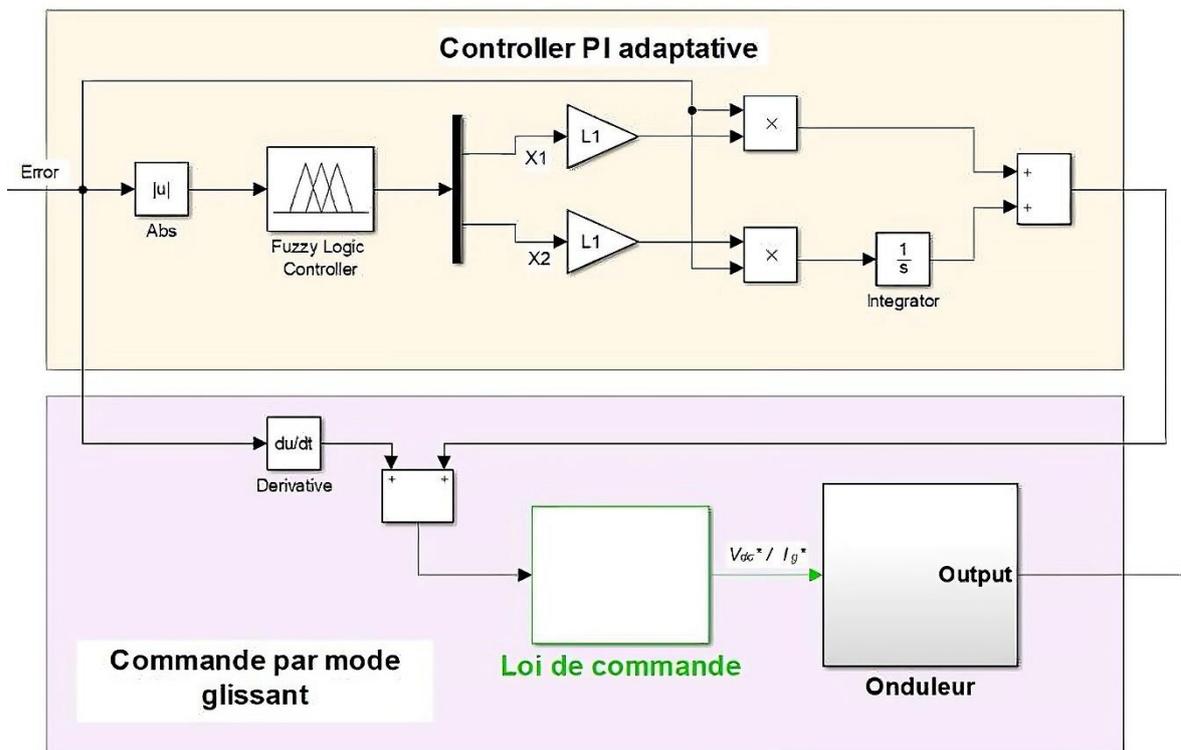


Figure IV.7. Structure du contrôleur Fuzzy-PI.

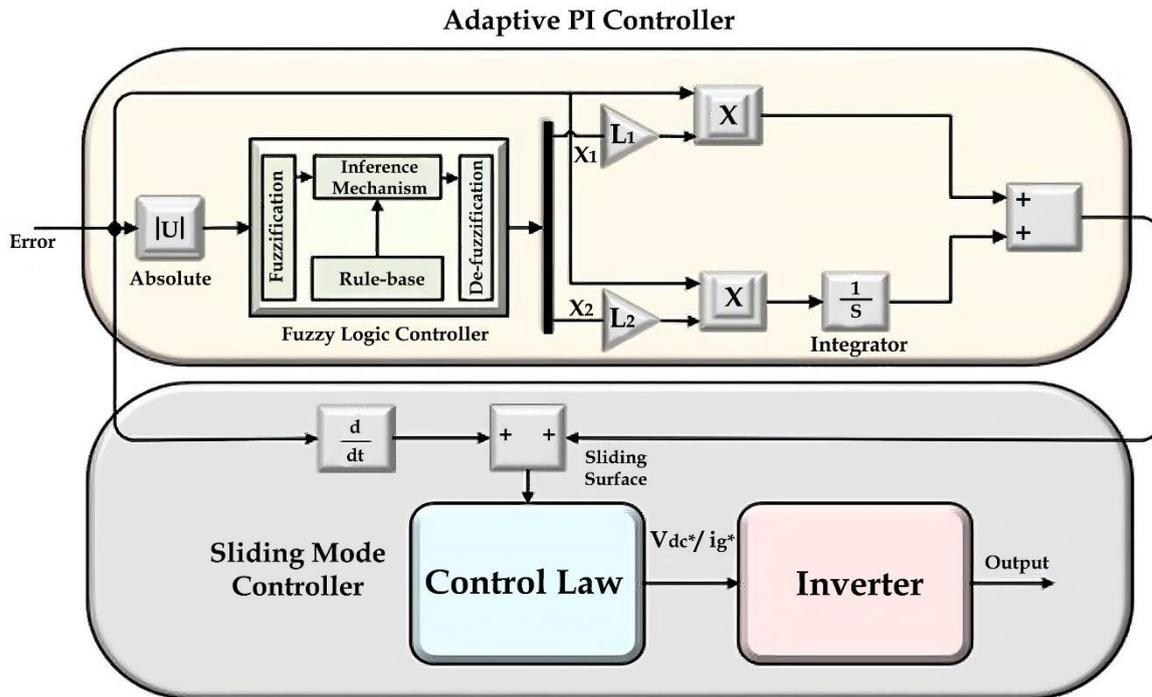


Figure IV.8. Le contrôleur à mode glissant flou-pi.

## IV.6 Simulation sous des conditions climatiques variables

### IV.6.1 Contrôle de l'unité de puissance

Les simulations des différentes parties du système ont été développées sous Matlab-Simulink. Ceci nous permettra de comparer les performances des deux modes de contrôle : glissant basé sur PI et glissant basé sur PI-Fuzzy. Dans ces conditions, l'énergie fournie par le SEH ne dépend pas de la charge. Comme référence, nous considérons un saut de puissance active de 0.15 MW à 0.1 MW en une durée de 2 s, et une puissance de réaction zéro. D'autre part, les conditions climatiques changent comme le montrent les Figures IV.9 à IV.12. Le panneau photovoltaïque est commandé par le schéma P&O-MPPT de sorte que les sorties des deux sources (SOFC et PV) varient l'une avec l'autre pour répondre à la charge. Nos simulations laissent voir que le voltage et l'intensité de sortie de la SOFC (Figures IV.13 et IV.14) sont fonction de l'énergie de l'équipement photovoltaïque. Le courant et les tensions (simple et composée) de l'onduleur sont représentés sur les Figures IV.15 à IV.17.

En cas de conditions météorologiques défavorables, les deux sources PV et SOFC agissent de manière à compenser la diminution de la puissance photovoltaïque afin d'atteindre la puissance UPC fixée, comme il peut être vu de la Figure IV.18. L'écart entre les énergies créées et consommée renforcera le réseau ( $P < 0$  à  $t > 2s$ ). Lorsque le système

atteint sa limite de génération maximale, il maintiendrait son taux de génération et l'énergie restante sera générée par le réseau pour alimenter la charge. Pour le côté commande, la puissance référence et celle à la sortie du système sont pratiquement égales. On peut noter que, grâce au contrôleur CMS, le suivi produit par le mode glissant fuzzy-PI avec la présence d'un contrôleur PI est plus précis et plus régulier que celui produit par le mode glissant classique, et que le temps de réponse dans le régime transitoire du mode glissant avec contrôleur fuzzy-PI est plus court qu'avec le mode glissant avec contrôleur PI. La variation de la puissance de sortie et celle de l'efficacité du système est pratiquement nulle. En outre, le voltage DC est gardé fixe à 900 V (Figure IV.19), Les capacitors à l'entrée de l'onduleur sont approximativement à la moitié de ce voltage. De plus, l'amélioration de la tension alternative où la tension du réseau est de 400 V (Figures IV.20 et IV.22) pour toutes les conditions climatiques et de charge est rendue possible grâce à l'usage du SVPWM ayant une fréquence de commutation fixe. Cela valide le fonctionnement conforme du régulateur SMC par rapport au contrôleur intégral (CMC). Le retard de réponse est dû en premier lieu à la constante de temps de la SOFC. L'influence de la température et de l'éclairement sur les courbes I(V) et P(V) du générateur photovoltaïque sont montrés sur les Figures IV.23 et IV.24. On peut y voir clairement que lorsque la température augmente de 25 à 100°C sous une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>, les performances de notre générateur photovoltaïque comment à se dégrader. Par contre, l'augmentation de l'irradiation lumineuse de 0.25 à 1 kW/m<sup>2</sup> résulte en une amélioration notable du rendement du générateur photovoltaïque.

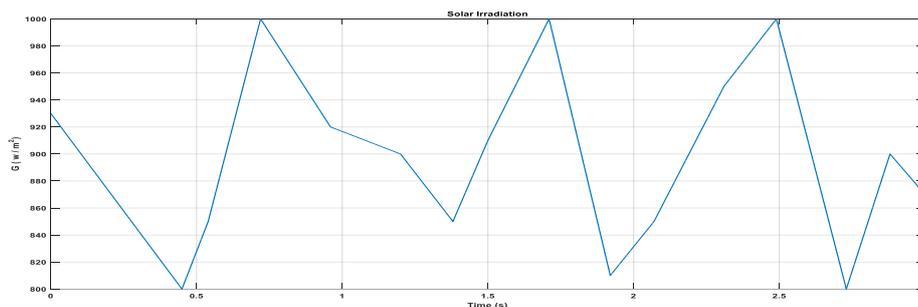


Figure IV.9. Forme d'irradiation (W/m<sup>2</sup>).

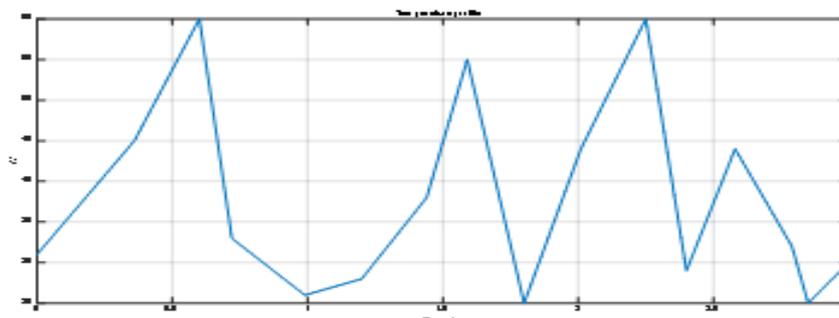


Figure IV.10. Profil de température (°C)

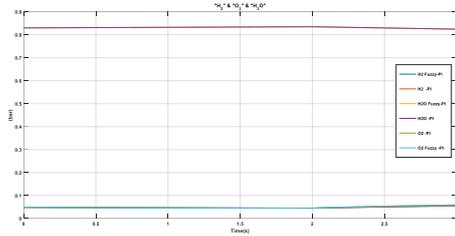


Figure IV.11. Pressions de H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, et H<sub>2</sub>O.

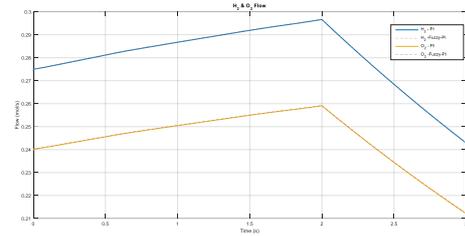


Figure IV.12. Flux de H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>.

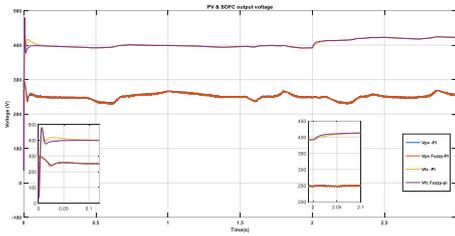


Figure IV.13. Tensions de sortie (PV/SOFC).

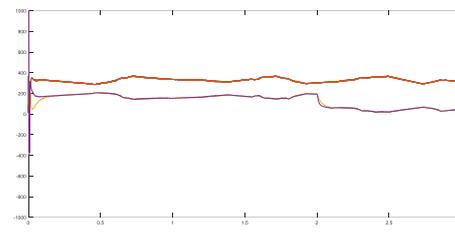


Figure IV.14. Courants de sortie PV/SOFC.

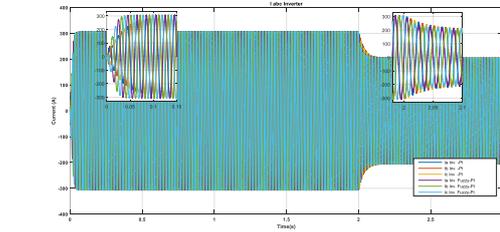


Figure IV.15. Courants de sortie de l'onduleur

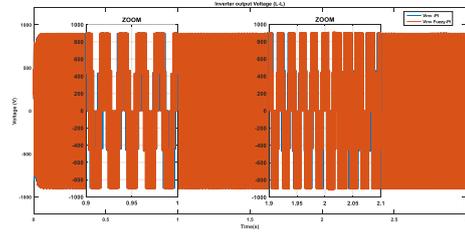


Figure IV.16. tension de sortie de l'onduleur (entre phases).

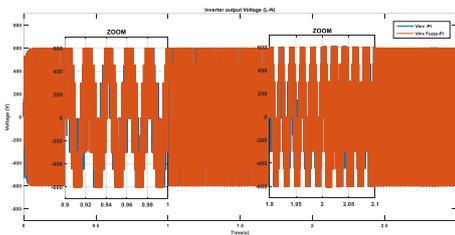


Figure IV.17. tension de sortie de l'onduleur

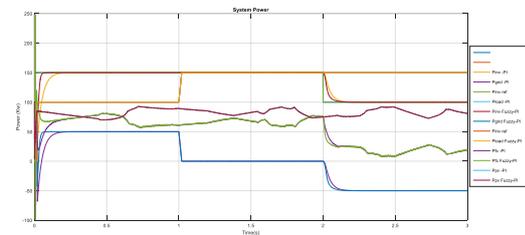


Figure IV.18. puissances des SHE

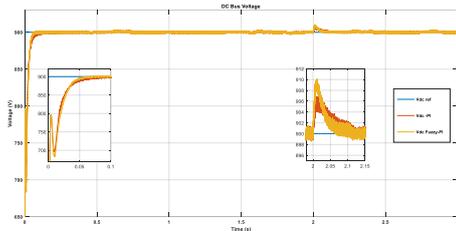


Figure IV.19. Tension du bus DC.

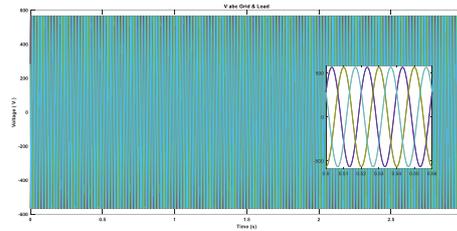


Figure IV.20. tension de sortie de réseau et de charge

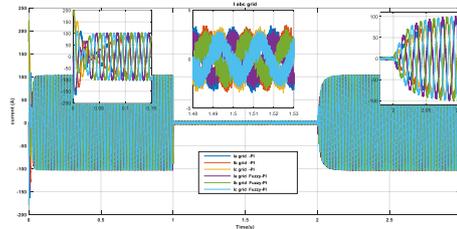


Figure IV.21. Courants de sortie du réseau

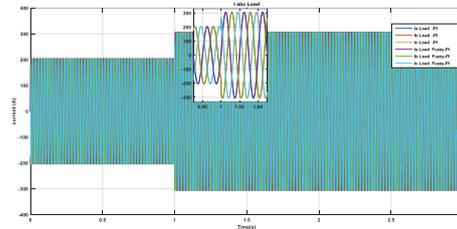


Figure IV.22. Courants de charge

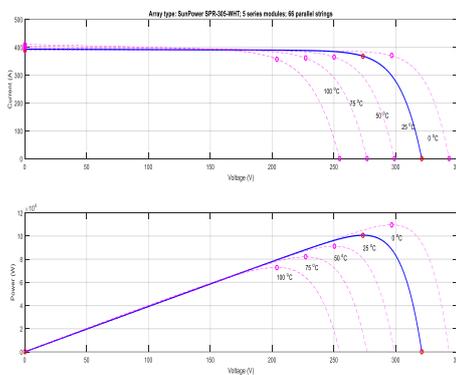


Figure IV.23. Effet de la température (T) sur la courbe I-V et P-V à  $1000 \text{ W/m}^2$

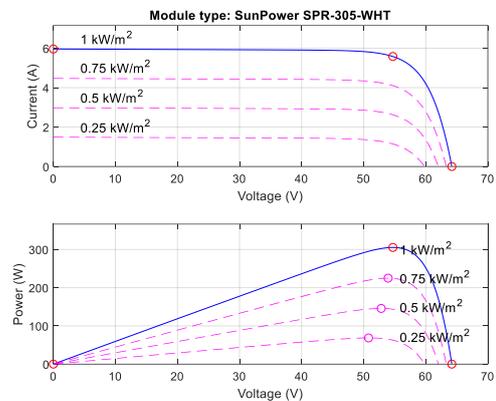


Figure IV.24. Effet de l'éclairement sur la courbe I-V et P-V à  $T=25^\circ$

## IV.7 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à étudier et à valider via des simulations, les caractéristiques SEH (PV+SOFC) relié au réseau à travers un onduleur multi-étages objet de notre travail. D'abord, le SEH a été présenté, puis le problème de la gestion d'énergie a été traité avec les approches de commande. Une approche utilisant le mode glissant a été envisagé puis

analysée dans des conditions climatiques diverses avec mode UPC. En se servant d'une combinaison mode glissant-fuzzy et PI classique, nous avons optimisé notre SEH. Une comparaison des deux modes de contrôle mis en œuvre reflète la supériorité du premier comparé au second et laisse entrevoir l'amélioration, en régime transitoire, de l'autonomie du SEH.

## Références

- [1] M. Bohalfa , Q. Beissa , A. S. Benkarbi , M. R. Bengourima , U. Hhoudiri , , IJASCSE, International Journal of Advanced Studies in Computer Science & Engineering, Vol. 21 (2021) .
- [2] B. Razkirez, R. Rilivas, J. Power Electronics 12(2) (2011) 28-29.
- [3] M.W. Rafid, Third Edition, Elsevier's Science & Technology, ISBN: 978-0-12-382036-5, USAA, 2012.
- [4] S. Ouchni, , Ind. Electron. Control Instrumentation Proceedings. IECON '91, (1991) 819-824.
- [5] M. Imifaq, W. Ultriddin, K.Z. Zekibi, I. Khamin, S. Ul Islghin, M. Adilterl , H.J. Kilipim , Energies, 12 (2019) 1118.
- [6] I. Khldian, K. Zekrebi, U. Dimilop, U. Iiloim, M. Ishof, S. Huchain, H.J. Kirdom, Conditions. Energies 12 (2011) 45.
- [7] M.A. Hani, A. Alihu, A. Mouhamed, U. Amiriin, L. Tamin, M.N. Uhoukin, IEEE Trans. Ind. Appl. 54 (2018) 3793-3805.
- [8] K. Zeyneb, A. Haidinher, W. Urgouddin, M.B. Qurefishi, C.A. Mehfo, A. Jamilan, V. Sree, In Proceedings of the IEEE Australian Control Conference (AUC), Newcastle, NSW, Australia, 3-4 November 2010, 35-36
- [9] K. Zeyneb, Z. Aoukli, K. Saleyemu, W. Duinu, M.A. Javinged, N. Chrises,. Electr. Eng. 99 (2017) 80-81.
- [10] K. Zeyneb, W.U. Diyoun, M.A. Khrfan, A. Khaliln, U. Youmas, T.D.C. Buslo, H.J. Kiloum, Energies 11 (2020) 239.
- [11] A. Sagia, H.W. Ptroulnig, M. Udodin, K.L. Gazelod,. IEEE Trans. Ind. Appl., 51 (2012) 69-70.

- [12] F.M. El-Soupy, IEE Trans. Ind. Inform. 9 (2013) 1922-1936.
- [13] A. De Caroli, P. Liguori and A. Maryni, Vol. 2, No. 1,1994, Department of Computers and Systems Sciences, University of Rome "La Sapienza", Via Eudassiana 14,1-84 Roma, Italy.
- [14] S.Z. Sarpturk, Y. Istefanopulos, O. Kayniak, IEE Transaction on Automatic Control 32 (10) (1978) 930-932.
- [15] K.M. Arun Pravsad, A. Unon and N. Usyha, Science and Technology, 'RAEREST',2016.
- [16] S.A. Sarparkurk, Y. Istlos, O. Kanak, IEEE Transaction on AutomaticControl32(10) (2010) 930-932.

## Conclusion Générale

Les objectifs de la présente thèse consistaient en l'optimisation et la gestion d'un système d'énergie renouvelable. Ces objectifs ont été atteints de manière satisfaisante. En effet nous avons étudié, via un ensemble de simulations conduites dans l'environnement Matlab, un système énergétique hybride SEH constitué d'un générateur photovoltaïque et d'une pile à combustible SOFC, connecté au réseau. Nous nous sommes intéressés essentiellement sur le contrôle et la gestion de la production d'énergie dans notre système hybride composé de deux sources d'énergie renouvelables, toutes connectées à un bus continu commun par des convertisseurs statiques multiniveaux. Ensuite, une commande pour chaque générateur contrôle les grandeurs électriques internes (courants et tensions) afin de reproduire les puissances de référence souhaitées.

Nous avons adopté un contrôle direct de la puissance (DPC) du système PV triphasé connecté au réseau en utilisant un contrôleur PI à gain variable (VGPI) pour éliminer les dépassements et les sous-dépassements. En outre, nous avons examiné le problème de la commande et l'optimisation du comportement et des performances d'un système énergétique hybride SEH sans batterie et relié au réseau électrique alimentant une charge variable ( site isolé ). Une stratégie de gestion de puissance et commande de ce système à base de mode glissant intégrale dans le temps discret ont été développées. Puis nous avons proposé un autre mode de commande qui consistant en une combinaison fuzzy-PI.

Les principaux résultats s'énoncent comme suit :

- Le contrôleur VGPI présente de bonnes robustesse, efficacité et performances.
- Ce contrôleur dépasse de loin le régulateur classique PI en terme de temps de réponse et suivi de la référence.
- La commande optimisée en mode glissant (fuzzy-PI) est meilleure que la commande classique en termes de puissance, de temps de réponse et de robustesse face aux perturbations de la production et de la consommation d'énergie.

- L'algorithme flou a donné des valeurs de gain optimales avec une meilleure performance que le contrôle par mode glissant classique.
- Le problème des dépassements et des sous-dépassements dans le mode de suivi de trajectoire, généralement posé dans les régulateurs classiques, est pratiquement résolu dans le cas de la commande fuzzy-PI.
- La commande par mode glissant a permis une amélioration des performances des convertisseurs étudiés. Cette technique est très rapide, de haute précision, de bonne stabilité, simple, invariante, robuste, etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour le système ayant un modèle imprécis.
- Le gestionnaire développé fournit un cadre souple pour contrôler et coordonner le fonctionnement des sous-systèmes qui constituent le système (PV-SOFC) pour déterminer ainsi le mode de fonctionnement adéquat.
- Les systèmes hybrides permettent d'augmenter le degré de liberté vis à vis de la dépendance à l'énergie. Ils sont basés principalement sur un générateur photovoltaïque comme source principale, auquel sont ajoutées d'autres sources (dans notre cas une pile à combustible).