

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR -ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة

Année 2018

Faculté des sciences de l'ingénierat
Département d'électrotechnique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT en sciences

Développement durable, optimisation et renforcement d'une
chaîne de production d'énergie d'origine renouvelable

Par
ABADLIA Issam

DIRECTEUR DE THESE : ADJABI Mohamed

Prof. UNIVERSITE D'ANNABA

DEVANT LE JURY

Président:	Mr.	OMEIRI	Amar	Prof.	Université d'Annaba
Rapporteur :	Mr.	ADJABI	Mohamed	Prof.	Université d'Annaba
Examineurs :	Mr.	LEMZADMI	Ahcène	Prof.	Université de Guelma
	Mr.	LABAR	Hocine	Prof.	Université d'Annaba
	Mr.	KHELIL	Khaled	Prof.	Université de Souk Ahras
	Mme.	AOUAOUA	Sabrina	MCA	Université de Souk Ahras

ملخص:

يعرض هذا العمل التنمية المستدامة لسلسلة إنتاج الطاقة المتجددة. كما أن تحسين وتعزيز السلسلة مدرج أيضا في عملنا، ونحن مهتمون بشكل خاص بالتغلب على مشكلة التقلب والتداخل في مصادر الطاقة المتجددة من خلال دمج مصادر أخرى من أنظمة التعزيز والتخزين. كذلك عرض أنظمة متعددة المصادر مايكرو وميني شبكات وفي الوقت نفسه، نسعى إلى تطوير الهياكل المثلى لسلاسل الإنتاج والبحث عن أفضل السبل لإعطاء إدارة جيدة للطاقة باستخدام التقنيات الذكية.

كلمات مفتاحيه: الطاقة المتجددة، تخزين الطاقة، الشبكة الصغيرة، الشبكة الذكية، إدارة الطاقة، الذكاء الاصطناعي.

Abstract:

This work presents the sustainable development of a renewable energy production chain. Reinforcement and optimization of the chain are also considered. In our work, we are particularly interested in overcoming the problem of variability and intermittency of renewable sources by integrating other sources of reinforcement and storage systems while presenting multi-source systems Micro and Mini grids. At the same time, we seek to develop optimal structures for the production chains and the best ways to give a good management of the power by using intelligent techniques.

Key words: renewable energy, energy storage, micro grid, smart grid, power management, artificial intelligence.

Résumé :

Ce travail présente le développement durable d'une chaîne de production d'énergie d'origine renouvelable. Le renforcement et l'optimisation de la chaîne sont aussi considérés. Nous nous intéressons en particulier, dans notre travail, à surmonter le problème de la variabilité et de l'intermittence des sources renouvelables en intégrant d'autres sources de renforcement et des systèmes de stockage tout en présentant des systèmes multi sources les Micro et les Mini Grids. À la fois, nous cherchons à développer des structures optimales pour les chaînes de production et les meilleures façons pour donner une bonne gestion de la puissance en utilisant des techniques intelligentes.

Mots clés : énergie renouvelable, stockage de l'énergie, Micro grid, Smart grid, gestion de puissance, intelligence artificielle.

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercié Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté ainsi que la patience, pour terminer ce travail.

Avant de commencer ce travail, je ne pensais avoir ni la force ni l'endurance d'aller jusqu'au bout... je ne pensais pas pouvoir vous présenter le fruit de tant d'heures de labeur sans la participation active de mon directeur de thèse **M. ADJABI Mohamed**, Professeur à l'université Badji Mokhtar/Annaba, à qui j'adresse mes vifs remerciements. Au-delà de son éternelle bonne humeur, il a su m'encourager dans les moments difficiles et me guider tout au long de cette thèse.

Mes remerciements à **M. OMEIRI Amar**, Professeur à l'université Badji Mokhtar/Annaba, d'avoir accepté de présider mon jury.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **M. LABAR Hocine**, Professeur à l'université Badji Mokhtar/Annaba; **M. LEMZADMI Ahcène**, Professeur à l'université 08 mai 45 de Guelma ; **M. KHELIL Khaled**, Professeur à l'université Mohamed chérif Messaadia/Souk-Ahras ; **Mme. AOUAOUDA Sabrina**, MCA à l'université Mohamed chérif Messaadia/Souk-Ahras de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être membres du jury de cette thèse de Doctorat.

Je ne vous ai pas oublié mes chers amis, chers frères et sœurs, vous êtes nombreux et vous vous reconnaissez sans nul doute. Votre présence m'a souvent été salutaire. Je ne vais pas vous nommer parce que vous êtes très nombreux... ☺

En ce jour mémorable pour moi, qu'ils trouvent, dans ce travail, la preuve modeste de ma vive reconnaissance et de mon profond amour.

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Tableau. 1.1 : Applications et services possibles fournis par la DG.....	10
Tableau. 1.2 : Coûts et avantages pour le système d'électricité induite par la DG.....	12
Tableau. 1.3: Applications et durée des technologies de stockage.....	20
Tableau. 1.4: Avantages et inconvénients des technologies de stockage.....	21

CHAPITRE 2

Tableau. 2.1 : Les principales démarches de l'algorithme P&O.....	31
--	-----------

CHAPITRE 3

CHAPITRE 4

Tableau. 4.1 : La vitesse du vent (SW), l'irradiation solaire (SI), la température (Temp) et les données de charge utilisées pour le scénario de base de simulation.....	116
Tableau. 4.2 : Résultats de comparaison de différentes méthodes d'optimisation.....	116

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure. 1.1 : Consommation d'électricité et des sources d'énergie primaires.....	4
Figure. 1.2 : Évolution de la demande d'électricité.....	5
Figure. 1.3 : Types et technologies pour la production décentralisée.....	7
Figure. 1.4 : Économie de DSO.....	11
Figure. 1.5 : Exemple d'un Microgrid.....	14
Figure. 1.6 : Coût des prévisions de l'électricité pour les technologies des énergies renouvelables.....	15
Figure. 1.7 : Exemple de profil du vent et de rayonnement pendant six quatre jours.....	17
Figure. 1.8 : Exemple de combinaison d'énergie incontrôlée éolienne/photovoltaïque.....	18
Figure. 1.9 : Corrélation entre les prix du marché et la production éolienne.....	19

CHAPITRE 2

Figure. 2.1 : Mode autonome a) sans étage d'adaptation ; b) avec étage d'adaptation.....	27
Figure. 2.2 : (a) onduleur avec source de courant ; (b) onduleur avec source de tension...	28
Figure. 2.3 : Chaîne de production photovoltaïque.....	29
Figure. 2.4 : Chaîne de production photovoltaïque en mode autonome.....	29
Figure. 2.5 : Algorithmes MPPT pour les systèmes solaires photovoltaïques.....	30
Figure. 2.6 : Architecture d'un ESN.....	32
Figure. 2.7: Principe de l'MPPT basé sur l'ESN.....	33
Figure. 2.8: Comportement de chasse des loups gris: (a) - (c) chasse et traque des proies; (d) des proies encerclées; et (e) attaquer une proie.....	34
Figure. 2.9: Vecteurs de position 2D et 3D et leurs prochains emplacements possibles.....	34
Figure. 2.10 : Hiérarchie du loup gris (la dominance diminue de haut en bas) avec la position en cours de mise à jour pour le GWO.....	35
Figure. 2.11: Réponse de la puissance avec utilisation MPPTs (P&O, ESN, GWO et ESN-GWO).....	38
Figure. 2.12: Classification des techniques de contrôle utilisées pour les VSI connectés au réseau.....	39
Figure. 2.13: Schéma de principe de l'IVOC dans la référence rotatif dq.....	40
Figure. 2.14: Schéma de principe de l'IVOC dans la référence fixe $\alpha\beta$	41
Figure. 2.15: Diagramme de VFOC.....	42
Figure. 2.16: Diagramme de DPC.....	43
Figure. 2.17: Diagramme de VF-DPC.....	44
Figure. 2.18: Diagramme de DPC-SVM.....	45
Figure. 2.19: Différentes topologies d'une chaîne de production éolienne.....	46
Figure. 2.20: Courbe de puissance idéale d'une éolienne.....	47
Figure. 2.21: Un schéma synoptique du système d'énergie éolienne utilisant le PMSM.....	47
Figure. 2.22: La caractéristique du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse.....	48
Figure. 2.23: Caractéristiques de la puissance de la turbine en fonction de la vitesse de la rotation pour une série de vitesses du vent.....	49
Figure. 2.24: Le schéma de principe du contrôle du rapport de vitesse.....	49
Figure. 2.25: Le schéma de principe du contrôle optimal du couple.....	50
Figure. 2.26: Le schéma de principe de la commande de retour du signal de puissance...	51
Figure. 2.27: Puissance de la turbine et caractéristiques de couple avec processus de suivi MPP.....	52
Figure. 2.28: HCS contrôle (a) une grande perturbation et (b) une petite perturbation...	52

Figure. 2.29: L'évolution coucou.....	54
Figure. 2.30: Optimisation de la commande PSF par CS.....	55
Figure. 2.31: Résultats de simulation a) Vitesse de vent ;b) vitesse de rotation; c) couple moteur de la turbine ; e) puissance de l'éolienne ; e) gain en puissance.....	56
Figure. 2.32: raccordement d'une éolienne au r réseau avec générateur à simple alimentation.....	57
Figure. 2.33 : raccordement d'une éolienne au réseau avec générateur à double alimentation.....	57
Figure. 2.34 : raccordement d'une éolienne au réseau en utilisant un convertisseur matriciel.....	57
Figure. 2.35 : Système hybride PV/éolienne à courant alternatif.....	59
Figure. 2.36 : Système hybride PV / éolienne à courant continu.....	59
Figure. 2.37 : PMSM basé sur l'intégration photovoltaïque et éolienne.....	60
Figure. 2.38 : Système hybride PV/éolienne à entrées multiples.....	60
Figure. 2.39 : Système hybride basé sur VSI.....	61
Figure. 2.40 : Système hybride avec SMES.....	62

CHAPITRE 3

Figure. 3.1: La chaîne de production d'hydrogène photovoltaïque.....	69
Figure. 3.2: Modèle de cellule d'une PAC.....	71
Figure. 3.3: Modèle de l'électrolyseur alcaline.....	73
Figure. 3.4: Profile de l'ensoleillement.....	75
Figure. 3.5: Consigne de la charge.....	75
Figure. 3.6: Puissance de la charge.....	76
Figure. 3.7: Puissance du GPV et de la PAC.....	76
Figure. 3.8: Puissance de l'électrolyseur.....	76
Figure. 3.9: Niveau de l'hydrogène dans le réservoir.....	77
Figure. 3.10 : Système de production d'hydrogène photovoltaïque.....	77
Figure. 3.11: Profile de l'irradiation solaire (13/07/2016) région de Bouzeria.....	78
Figure. 3.12 : Taux de conversion des gaz et niveau de réservoir du H2.....	78
Figure. 3.13 : Puissance de l'électrolyseur.....	78
Figure. 3.14 : Profile de l'irradiation solaire (23/12/2016) région de Bouzeria.....	79
Figure. 3.15 : Taux de conversion des gaz et niveau de réservoir du H2.....	79
Figure. 3.16 : Puissance de l'électrolyseur.....	79
Figure. 3.17 : Profile de l'irradiation solaire (07/02/2017) région de Bouzeria.....	80
Figure. 3.18 : Taux de conversion des gaz et niveau de réservoir du H2.....	80
Figure. 3.19 : Puissance de l'électrolyseur.....	80
Figure. 3.20 : Profile de l'irradiation solaire (17/04/2017) région de Bouzeria.....	81
Figure. 3.21 : Taux de conversion des gaz et niveau de réservoir du H2.....	81
Figure. 3.22 : Puissance de l'électrolyseur.....	81
Figure. 3.23 : Configuration du système hybride PV-FC connecté au réseau.....	83
Figure. 3.24 : Contrôle côté production photovoltaïque.....	84
Figure. 3.25 : Contrôle côté production hydrogène.....	84
Figure. 3.26 : (a): tension non en phase avec le courant; (b): tension en phase avec le courant.....	85
Figure. 3.27 : Topologie de contrôle basé sur la stratégie SMC pour un système hybride PV-H2 connecté au réseau.....	88
Figure. 3.28 : Tension de bus continu.....	90
Figure. 3.29 : tension a la sortie de l'onduleur: (a) Zoom avant filtrage; (b) Zoom après filtrage.....	91
Figure. 3.30 : Puissances du système: (a) active; (b) réactive; (c) Puissance PPV et PFC...	92
Figure. 3.31 : Niveau de H2 dans le réservoir.....	92
Figure. 3.32 : (a) Courant et tension de ligne; (b) Différents zooms de courant et de tension de ligne.....	93
Figure. 3.33 : Angle de phase 'ζ' entre le courant et la tension de ligne.....	94

CHAPITRE 4

Figure. 4.1 : Structure d'un microgrid.....	97
Figure. 4.2 : Architecture du smart grid.....	99
Figure. 4.3 : Principe du système de gestion de l'énergie.....	101
Figure. 4.4 : Architecture de MG.....	106
Figure. 4.5 : (a) Crossover DE classique et (b) crossover MLCDE.....	112
Figure. 4.6 : Organigramme du MLCDE proposée.....	113
Figure. 4.7 : États ON/OFF de marche des DEGs.....	114

Liste des notations et symboles

NOTATIONS

PVG	Générateur photovoltaïque
WT	Wind turbine
FC	Fuel cell
Batt	Batterie
GD	Générateur diesel
MG	Micro grid
SG	Smart Grid
DG	Distribution génération
PI	Proportionnel intégrale
IA	Intelligence artificiel
ESN	Echo state network
GWO	Gray wolf
CS	Cuckoo search
MPPT	Maximum power point tracking
P&O	Perturbation et observation

SYMBOLES

H₂	Atome de l'hydrogène
O₂	Atome de l'oxygène
H₂O	atome de l'eau
U	La tension pratique
I	Courant
T_j	Température de jonction cellulaire
E_s	Rayonnement solaire
j	Densité de courant
P	Puissance
W_t	Energie théorique
W_r	Energie réelle
ε_F	Rendement faradique
εΔG	Rendement énergétique
εΔH	Rendement enthalpique
Ac	Le corps d'électrolyte
σ_m	La conductivité ionique de l'électrolyte membrane
η	Potentiel ohmique
m_{H2}	Taux de production d'hydrogène
m_{O2}	Taux de production d'oxygène

Table des Matières

Résumé en arabe	I
Résumé en anglais	II
Résumé en anglais	III
Remerciements	IV
Liste des tableaux	V
Liste des figures	VI
Liste des notations et symboles	IX
Table des matières	X
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 <i>Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes</i>	
1.1. Introduction	3
1.2. Statistiques et prévisions	4
1.3. Génération décentralisée	7
1.3.1. Impact sur le réseau de connexion DG	8
1.3.2. Une vue économique et de marketing	10
1.4. Les nouvelles architectures de réseau	13
1.5. Les questions relatives aux énergies renouvelables	14
1.5.1. Évolution de l'énergie renouvelable et leurs applications	14
1.5.2. Stockage et hybridation	19
1.6. Conclusion	22
1.7. Bibliographie	23
CHAPITRE 2 <i>Étude d'une chaîne de production d'origine renouvelable</i>	
2.1. Introduction	26
2.2. Chaîne d'origine renouvelable et modes d'opération	27
2.2.1. Mode autonome	27
2.2.2. Raccordement au réseau	28
2.3. Étude d'une chaîne de production photovoltaïque	28
2.3.1. Étude de la commande en mode autonome	29
2.3.2. Simulations et analyses	37
2.3.3. Étude de la commande en mode raccordement au réseau	39
2.4. Étude d'une chaîne de production éolienne	46
2.4.1. Étude de la commande en mode autonome	47
Université Badji Mokhtar Annaba	X

2.4.2. Le raccordement de l'éolienne au réseau	57
2.5. Étude d'une chaîne de production hybride PV/ éolienne	58
2.6. Conclusion	62
2.7. Bibliographie	63

CHAPITRE 3 *Renforcement de la chaîne renouvelable en utilisant des systèmes de stockages*

3.1. Introduction	66
3.2. Stockage de l'énergie électrique	67
3.3. Étude d'une chaîne de production hydrogène photovoltaïque	69
3.3.1. Modélisation mathématique.....	70
3.3.2. Simulations et analyses	75
3.3.3. Banc d'essai	77
3.4. Raccordement au réseau de la chaîne de PV/H2 en utilisant la technique de commande par mode glissant	82
3.4.1. Contrôle côté génération de la puissance	83
3.4.2. Contrôle côté réseau	84
3.4.3. Simulation et analyses	
3.5. Conclusion	88
3.6. Bibliographie	94

CHAPITRE 4 *Systèmes smart et gestion de l'énergie*

4.1. Introduction	96
4.2. Le micro grid	97
4.2.1. Définition	97
4.2.2. Les avantages de microgrid	98
4.2.3. Le Mini grid	98
4.3. Le Réseau intelligent (Smart Grid)	99
4.3.1. Qu'est-ce qu'un Smart Grid ?.....	99
4.3.2. Le rôle et les avantages de Smart Grid.....	99
4.4. Gestion de l'énergie	101
4.4.1. Principe de la gestion de l'énergie	101
4.4.2. Stratégies de gestion de l'énergie dans les Smart Grid	102
4.5. Développement d'un algorithme de gestion de l'énergie pour un système micro-grid en utilisant la modélisation et l'optimisation par un algorithme d'évolution différentielle chaotique basé sur l'apprentissage multi-cross	102
4.5.1. Les démarches à suivre pour le développement de l'algorithme proposé pour la gestion de la puissance dans le MG	102
4.5.2. Architecture d'un Microgrid.....	105
4.5.3. Analyse de fonctionnement et traitement des données	107
4.5.4. Modèle d'optimisation proposé pour le fonctionnement de la MG	107
4.5.5. Algorithme d'optimisation	109

4.5.6. Application de l'algorithme d'optimisation	112
4.5.7. Résultats et analyses	115
4.6. Conclusion.....	117
4.7. Bibliographie	118
CONCLUSION GÉNÉRALE	120
ANNEXE	121

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est en augmentation dans ces dernières années et les contraintes liées à sa production, telles que les effets de la pollution, ont conduit au développement de l'énergie renouvelable en raison de sa disponibilité pour répondre à la future demande et créer une économie d'énergie durable sans pollution.

Toutefois, la variabilité et l'intermittence sont quelques-unes des caractéristiques principales liées aux énergies renouvelables. L'intermittence comprend généralement des variations prévisibles et imprévisibles. Du fait de leur nature intermittente, il est très difficile de prévoir la production d'énergie, ce qui nécessite soit des centrales de réserve supplémentaires, soit de nouvelles technologies de stockage et de contrôle. La réserve rotative traditionnelle ne peut pas entièrement compenser les changements soudains dans la production d'énergie renouvelable. L'augmentation du nombre de centrales électriques renouvelables aussi menace l'équilibre du système électrique. Tous Ces inconvénients peuvent être surmontés en considérant quelques études de conception particulière. En utilisant de nouvelles technologies il est possible d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie et l'établissement de plans de conservation de l'énergie dans le cadre de leurs législations connexes. Le développement a couvert diverses sources renouvelables, des sources de secours et des systèmes de stockage. Le fait de les combiner avec des sources conventionnelles pour alimenter des charges isolées ou de mini et de micro grid est la solution pour assurer la continuité de l'approvisionnement en raison de la nature intermittente des sources renouvelables.

L'augmentation de la compacité des puissances électriques au cours des dernières années a largement contribué à la gestion efficace du besoin, ce qui nécessite de connaître les performances de l'ensemble du système électrique à travers la mise en place de systèmes de technologie numérique. Ces systèmes peuvent fournir des informations pour améliorer la gestion des systèmes électriques. D'autre part, la fonction de base d'un système d'alimentation électrique moderne est de fournir un approvisionnement électrique adéquat à ses clients aussi économiquement que possible et avec un niveau de fiabilité raisonnable.

Les réseaux intelligents ou Smart Grid sont basés sur la technologie de l'information intégrée, les télécommunications, l'auto-commande et le contrôle du réseau électrique, impliquant des capteurs et des dispositifs de gestion de réseaux numériques, permettant le déploiement de stratégies de contrôle et l'exploitation de réseaux électriques, avec un traitement rapide. Cette convergence des technologies offre un volume de données définies, y compris des traitements des informations et de l'évaluation de la tension, du courant et de la perte de puissance. La gestion des flux de production, nécessitant l'élaboration d'un nouveau modèle de commande et d'optimisation pour l'utilisation d'un système électrique. En outre, il existe de nombreuses autres caractéristiques qui peuvent être offertes, par exemple des charges différenciées, la gestion des prix et des coûts, permettant l'utilisation de la gestion de la demande pour optimiser des systèmes de production de l'énergie électrique.

Nous nous intéressons dans cette thèse à l'étude des chaînes de production renouvelable. Ce travail vise principalement à apporter une contribution à la compréhension et au contrôle des systèmes à énergies renouvelables par l'analyse et la conception des stratégies de contrôle et de gestions efficaces. Cette thèse présente une revue bibliographique sur les topologies et les stratégies de contrôle des systèmes renouvelables, la problématique liée à la gestion ou au contrôle d'un système hybride avec stockage et l'optimisation / la gestion du transfert de puissance.

La thèse est structurée en quatre chapitres. Le premier fournit un cadre multi-environnement des besoins et des exigences des unités de production actives dans les systèmes d'énergie électrique actuels et futurs. Il établit une approche claire pour le développement du travail à effectuer. Le chapitre 2 examine des généralités sur la production et l'exploitation de l'énergie renouvelable ou, plusieurs topologies et architectures des chaînes renouvelables sont investiguées. Le chapitre 3 analyse et définit des modèles pour les différents éléments intégrant le stockage de l'énergie, en précisant le type indirect de stockage 'l'hydrogène', afin de renforcer la chaîne de et établit des outils de simulation appropriées. Le chapitre 4 encadre le domaine des services de réseau, à savoir les réseaux intelligents et la gestion de puissance, établir des stratégies appropriées pour le développement des algorithmes fiables et flexibles pour la gestion optimale de l'énergie.

Finalement, une présentation des conclusions et suggère des travaux connexes futurs.

*Chapitre 1: Contexte de la production d'énergie
renouvelable et de nouveaux paradigmes*

1.1. Introduction

La diminution des ressources énergétiques fossiles et la hausse durable de leur prix, l'augmentation considérable des besoins en énergie, les difficultés d'approvisionnement, le poids du secteur énergétique dans les émissions de CO₂ et la lutte contre le changement climatique imposent d'adapter les modes de production et de consommation d'énergie. Face à cette situation, il est naturel de se demander quelle sera l'alternative à ces différentes énergies. Il semble que les énergies renouvelables soient un des éléments de réponse à cette question. Les énergies renouvelables sont des énergies écologiques car faiblement émettrices de gaz à effet de serre. La production d'électricité se fait à partir d'énergie gratuite et renouvelable. L'exploitation des énergies renouvelables permet de fournir de l'électricité aux sites isolés et d'éviter la création de nouvelles lignes. Ce sont les raisons pour lesquelles la plupart des États font des énergies renouvelables une priorité de leur politique énergétique.

La maîtrise des consommations d'énergie arrive au premier rang des politiques qu'il faut rapidement mettre en œuvre parce que c'est celle qui possède le plus grand potentiel, qu'elle est applicable dans tous les secteurs et dans tous les pays, qu'elle représente le meilleur instrument de la lutte contre le changement climatique, enfin parce qu'elle permet de ralentir l'épuisement des ressources fossiles, tandis qu'une part croissante de la consommation d'énergie peut être assurée par les énergies renouvelables. Elle constitue en outre un facteur de développement économique par la diminution des dépenses énergétiques, ainsi que par la création de nouvelles activités et d'emplois. C'est un impératif de premier ordre des politiques énergétiques et économiques, notamment dans le secteur des transports, presque exclusivement dépendant du pétrole. Cela s'impose aussi en matière de consommation d'électricité, dont la production est chère et particulièrement vorace en énergie primaire.

Ce chapitre expose l'importance des énergies renouvelable dans le secteur énergétiques. Ainsi les technologies modernes utilisées dans ce secteur afin d'assurer une exploitation flexible et économique.

1.2. Statistiques et prévisions

Depuis quelque temps déjà, la communauté scientifique mondiale tend à s'accorder concernant l'influence de l'activité humaine sur le réchauffement climatique. Un consensus se dégage également concernant l'évolution de la démographie mondiale vers un pic à 9 milliards d'êtres humains aux environs de 2050 (pour environ 6 milliards aujourd'hui) suivi d'une lente décroissance pour revenir aux environs de 7 milliards vers 2100. Parallèlement, l'actualité récente nous démontre la forte probabilité d'augmentation du coût des énergies fossiles dans un avenir proche, quelle que soit leur nature et les pénuries à moyen terme pour certaines d'entre elles. De nouveaux besoins apparaissent déjà dans certaines parties du monde quant à la sécurisation de l'approvisionnement en énergie au niveau local. Il y a une tendance continue à la croissance de la demande d'énergie électrique (Figure. 1.1), non seulement dans l'environnement industriel/commercial, mais aussi, et surtout, dans l'environnement utilisateur à domicile et les transports [1].

Il est prévu une croissance de 22% par an entre 2010 et 2035, avec 80% se produisant dans les pays non membres de l'OCDE à la demande de l'électricité pour atteindre 10% de la demande totale d'ici à 2035 (Figure. 1.2) [2]. L'augmentation de la demande de l'énergie pose un problème de capacité de production. La solution historique a été prise en charge sur l'installation de grandes centrales électriques, impliquant de gros investissements et un risque plus élevé quand ils opèrent dans la déréglementation des marchés de l'électricité [3].

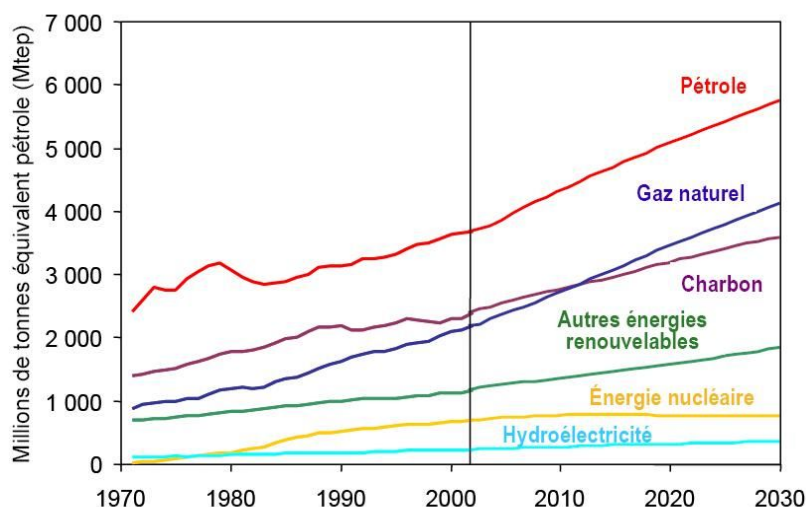


Figure. 1.1 : Consommation d'électricité et des sources d'énergie primaires [4].

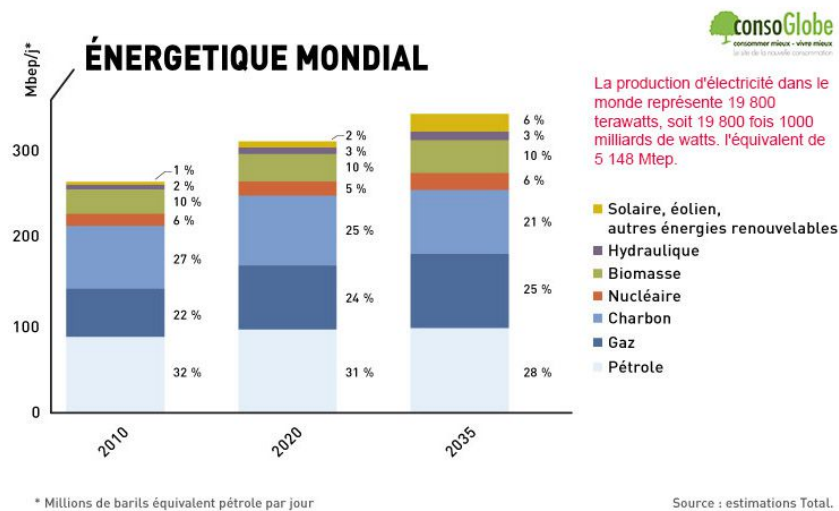


Figure. 1.2 : Évolution de la production d'électricité (Agence européenne de l'environnement).

La production d'électricité a trouvé des problèmes aux exigences de nouvelles énergies. La charge de transmission devrait croître au cours des dix prochaines années de 22 à 25%, mais le réseau devrait toutefois croître moins de 4%, en raison des contraintes de régulation économiques, environnementales, techniques et gouvernementales [5]. De plus, il y a un certain nombre de questions que les participants dans le domaine doivent considérer, comme [6]:

- Les préoccupations environnementales croissantes, à savoir avec des gaz à effet de serre (émissions de CO₂ liées aux hydrocarbures).
- Tenter d'atteindre l'indépendance énergétique des pays tiers afin de réduire le prix de base du carburant.
- Développement de nouvelles règles économiques et financières qui découlent de la déréglementation des marchés énergétiques.

Ces problèmes rendent l'environnement électrique plus difficile à gérer que par le passé. Ils contribuent également à un changement de paradigmes. Les cinq principaux facteurs qui contribuent à l'évolution des points de vue des systèmes électriques identifiés par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) et sont les suivants :

- L'évolution des technologies de production décentralisée ;
- Les contraintes sur la construction de nouvelles lignes de transmission ;
- Augmentation de la demande des clients pour l'électricité très fiable ;
- La libéralisation du marché de l'électricité ;
- Les préoccupations concernant le changement climatique.

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

Les solutions à ces problèmes ont été orientés vers la diffusion de la production décentralisée également appelée la génération distribuée (DG) et au développement de nouvelles structures du système électrique. DG à partir de sources d'énergie renouvelables sont particulièrement bien placées pour répondre aux préoccupations réelles telles que l'environnement, elles ne produisent pas de déchets dans le processus de conversion, économique et les sources sont disponibles partout [7].

La dynamique historique des systèmes d'approvisionnement en électricité à long terme observent que, dans une perspective historique, la préoccupation actuelle ou problème critique pour la création d'un terrain de jeu de niveau pour la production décentralisée et centralisée est remarquable. Cette préoccupation semble tout à fait opposée au problème critique dominant dans les années 1950 et 1960, qui étaient de réduire la contribution de la production distribuée à l'approvisionnement en électricité du public, autant que possible, afin d'obtenir des avantages d'échelle [8].

Il n'est donc pas surprenant que les systèmes actuels ont un biais intrinsèque vers la production centralisée. Arguments pour grande production d'électricité à grande échelle au cours de l'ère de l'augmentation à l'échelle et de l'expansion étaient des économies d'échelle, la construction de centrales électriques (charbon) situés à proximité des sites miniers et intégrés avec hydro, économies d'investissement sur les unités de sauvegarde et d'éviter la surcapacité. Plus tard dans de nombreux pays, l'introduction des centrales nucléaires conduisent également à la production centralisée [9]. En raison de la disponibilité croissante du gaz naturel dans de nombreux pays, les préoccupations environnementales et le développement technologique augmentent à l'échelle et l'implantation des sites de production d'énergie sont devenus de moindre importance. En conséquence, dans les années 1970 et 1980 les systèmes d'électricité dans certains pays ont commencé à développer des systèmes centraux dans la direction des systèmes hybrides, hébergement centralisé ainsi que des unités de production décentralisées dans un seul et même système.

Les possibilités pour la DG dans l'électricité sociotechnique actuelle systèmes d'approvisionnement sont conditionnées par les caractéristiques du système développé à l'ère de la centralisation et la façon dont les acteurs ont traité ces questions depuis les années 1970.

1.3. Génération décentralisée

La production décentralisée, également connu sous la production intégrée, génération dispersée, sur place génération et la production distribuée, n'a pas encore une définition formelle acceptée. Cependant, il peut être défini comme l'utilisation de technologies à petite échelle de production d'électricité situées à proximité de la charge étant servie. Aussi dans [8], il est soutenu qu'il n'y a pas de consensus sur la définition et présente des points de vue de l'organisation tels que : le but, l'emplacement, note, zone de livraison, type de technologie, impact sur l'environnement, le mode de fonctionnement, la propriété et le niveau de pénétration. Il propose également une définition générale comme «production d'énergie électrique dans les réseaux de distribution ou sur le côté client du réseau ». En général, la définition de la DG (CIGRE, CIRED, IEEE, AIE) comprend trois idées principales [8,9]:

- Petite source d'énergie (sous-kW à quelques MW).
- Partout interconnectée dans le réseau de distribution (du côté client du compteur).
- Au-delà du contrôle de l'opérateur de transmission.

Un résumé du DG est présenté sur la figure. 1.3.

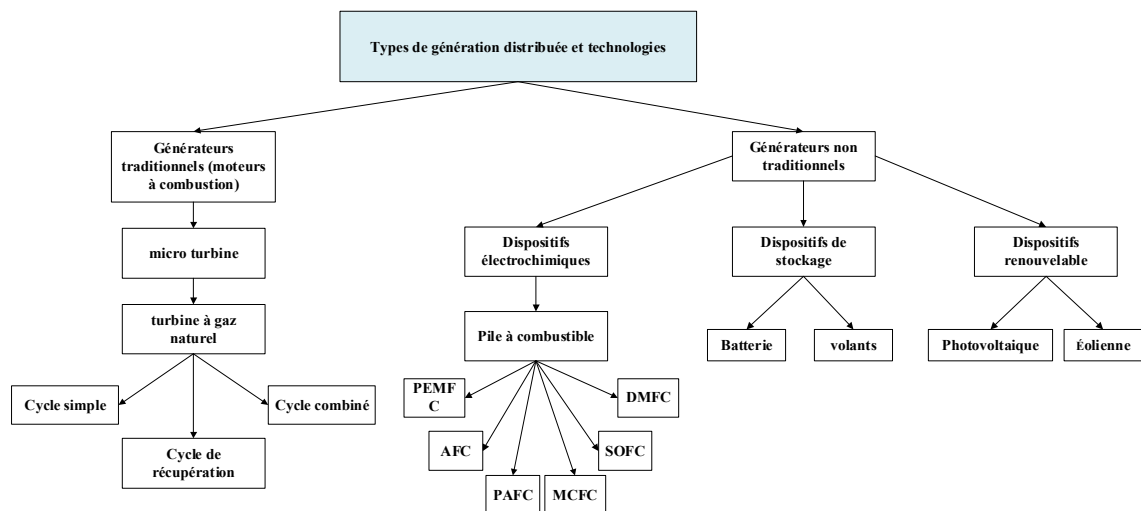


Figure. 1.3 : Types et technologies pour la production décentralisée [10].

Le développement de l'électronique de puissance ainsi que le développement des technologies de l'information et de la communication (TIC) ont été un effet de levier vers les solutions pour certains des problèmes que la production décentralisée pose aux réseaux électriques lorsque connecté. Bien que l'adoption de la DG semble faire face à des difficultés liées aux spécificités de chaque pays, à savoir les caractéristiques du

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

système d'alimentation centralisé existant [7], il devrait néanmoins continuer à croître.

Une part DG qui pourrait atteindre 30% dans les années à venir, où une grande quantité d'énergie produite localement sera également consommée localement, donnera au réseau de distribution un caractère local [11]. La prise en chiffres de pénétration de contrepartie attendue, une analyse des avantages et des inconvénients qui viennent de la propagation de la DG lorsqu'il est connecté au réseau électrique est nécessaire. De [2] les avantages de l'utilisation DG sont les suivants :

- afin de permettre une durée raisonnable de puissance réduite (moins d'un kW à quelques MW) ;
- être situé à proximité des charges - capacité de dispersion à travers le réseau et les pertes en réduisant la capacité ;
- pour être connectés au réseau îlot ;
- pour effectuer des services ;
- pour permettre des investissements de réseau report ;
- avoir réduit l'investissement, le temps d'installation et un peu d'entretien ;
- pour permettre l'utilisation de la production d'énergie renouvelable.

Et selon [2], [12,13], les questions soulevées par la DG sont :

- Les réseaux sont conçus pour flux de puissance unidirectionnels ;
- Unités de génération ne sont pas au centre dispatché ;
- Préoccupations techniques des services publics sur la connexion DG à savoir les contributions de court-circuit et les systèmes de protection prédéfinis ;
- Les difficultés dans la répartition des coûts d'adaptation des réseaux ;
- Problèmes de dosages liés aux flux de puissance modifiés ;
- L'absence de normes d'interconnexion et des règlements de traitement des demandes ;
- Perte de revenus des services publics pour chaque kWh produit par la DG ;
- Diminution éventuelle de la fiabilité globale du réseau.

1.3.1. Impact sur le réseau de connexion DG

Compte tenu des problèmes que la diffusion de la DG soulève, il est important d'avoir un aperçu de leur impact lorsqu'ils sont connectés à des réseaux électriques existants. Le problème général avec l'intégration dans les réseaux existants dans son ensemble, y compris non seulement la plante génération, mais aussi les infrastructures

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

auxiliaires nécessaires pour relier la génération au réseau (sous-stations, des lignes de transmission, les protections, etc.) [12], [14].

Par ailleurs, le réseau connecté DG n'est généralement pas en mesure de fournir le système services contrôle de la tension et de la fréquence, la livraison de courant de défaut, faute capacité nécessaire pour assurer un fonctionnement stable du système électrique [15]. Plus précisément, DG est généralement intégré dans des réseaux électriques qui ont une structure de contrôle basée sur un réseau de distribution qui est un élément passif pour le réseau de transmission. Dans cette structure de typologie transport / distribution la génération est reliée principalement au réseau de transmission et les flux d'alimentation sont unidirectionnel à partir de la génération de charges. Ainsi, il ne nécessite pas beaucoup de coordination plus opérationnelle entre les réseaux de transport et de distribution [16]. Avec DG, le réseau de distribution devient un système actif ce qui conduit à une situation multiple entrée de courants de charge et de défaut.

L'un des avantages potentiels de la DG connectés au réseau basse tension est une augmentation de la qualité du service, la fiabilité et la sécurité, ce qui prouve qu'il sera intégré d'une manière intelligente dans les pratiques de planification du système d'alimentation [17]. Dans les réseaux connectés avec DG, tandis que l'amplitude de la puissance DG est plus petite que la sous-station d'alimentation du réseau, le fonctionnement du système ne dépend pas de manière critique de la production locale. Si ce n'est pas le cas, la DG est considérée par les opérateurs de réseau comme un problème principalement en raison de l'impact important des systèmes de protection de courant de défaut et préexistants peut-être la barrière technique majeur pour l'intégration à grande échelle [18,19]. Dans ce cas, et en supposant une capacité non répartissable d'unités DG, il existe un double effet d'une réduction du nombre d'unités dispatchées qui ont été substitués par le DG non répartissable avec l'augmentation de la demande dans les unités restantes. Mais il peut être aussi considéré comme ayant un effet bénéfique sur la sécurité des clients de l'offre si îlotage est autorisé. Un autre effet bénéfique potentiel de la DG serait de soutenir et d'aider le réseau dans des conditions anormales telles que des situations de démarrage noir puisque la disponibilité de l'énergie reste dans la DG et ne dépend pas de la connexion au réseau de transport. Le déclenchement des unités DG ne peut plus être la procédure standard pour toutes sortes de troubles et ils doivent plutôt être en mesure de résister aux plus grandes variations de tension et la fréquence [20].

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

1.3.2. Une vue économique et de marketing

La production d'électricité fait face non seulement à des problèmes technologiques, mais aussi d'autres problèmes non encore très familiers. L'un d'eux est le changement d'une vue de monopole à une vue sur le marché ouvert. L'inclusion du point de vue marketing est un autre changement de paradigme qui impose un nouveau comportement. Comme DG est situé à proximité des charges moins de transport d'énergie est nécessaire. Cela peut affecter négativement les entreprises gestionnaires de réseaux de distribution (GRD), car il représente la baisse des revenus pour eux. Comme DSO (Days Sales Outstanding) agit généralement dans un environnement monopole protégé par la réglementation et les fournisseurs DG dans un environnement de marché ne se limite pas par règlements, l'élaboration de nouveaux cadres d'entreprises seraient favorables à l'exploitation des opportunités perçues pour la DG [21,22].

Tableau. 1.1 : Applications et services possibles fournis par la DG [23].

Service fourni	Chaleur et puissance combinée	Alimentation de secours	Écrêtage	Réseau supporté	Autonome
Énergie	La production simultanée d'électricité et de chaleur utile fournit de l'énergie à faible coût aux clients	la production d'énergie est minimale et fait partie de la valeur globale	fournir une alternative à l'énergie période pic de coût élevé	réduit les pertes de ligne, peut être important dans les parties éloignées ou encombrées du système T et D	doit fournir des exigences complètes des clients
capacité	fournit une capacité lors de l'exécution	capacité de réserve du client	évite les coûts de capacité du système de période de pointe élevée	peut aider à éviter les contraintes de capacité T et D	doit fournir des exigences complètes des clients
Système de réserve	Si le système fonctionne à pleine charge, il n'y a pas de réserve par définition	extension possible de l'application actuelle, mais ne faisant pas partie de la plupart des systèmes de secours actuels	pourrait fournir une réserve de filature et d'attente pendant les périodes creuses	pourrait fournir une réserve de filature et d'attente pendant les périodes creuses	doit fournir des exigences complètes des clients
fiabilité	Les systèmes sont généralement aussi fiables ou plus que les généralistes individuels.	l'objectif principal est d'atteindre une fiabilité de 100% pour des raisons de santé et de sécurité	augmente la fiabilité du client et peut faire partie d'un programme d'utilité pour réduire les pannes	augmente la fiabilité en raison des pénuries d'approvisionnement, des contraintes T et D et des pannes liées aux tempêtes	doit fournir des exigences complètes des clients
Qualité d'énergie	fournit au client une protection contre les problèmes de réseau,, peut faire partie d'un système client de qualité supérieure	pas un problème primaire, mais peut faire partie d'un système client de qualité supérieure	peut aider le client à éviter les creux de tension et les baisses de tension qui surviennent en cas d'urgence du système	peut être utilisé pour la correction du facteur de puissance et le support de tension	doit fournir des exigences complètes des clients
Service de sauvegarde	pour chaque baisse de 1% de la disponibilité du générateur, le système nécessite 87 heures de service de sauvegarde. sauvegarde pour l'entretien pendant les périodes de paix, mais les pannes forcées peuvent se produire à tout moment	le système est le service de secours, donc aucun service de secours séparé n'est requis	pic-rasage peut être une extension du service de sauvegarde	le support de réseau améliore le système T et D en général, pas spécifique au service de sauvegarde	doit fournir des exigences complètes des clients

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

D'un point de vue économique, l'utilisation de la DG pose des problèmes, compte tenu d'un environnement de marché libéralisé. En premier lieu, l'investissement global de la DG représente une valeur plus faible, leur coût unitaire est plus grand car ils ne profitent pas du facteur d'échelle [24]. En second lieu, la DG pose des problèmes de fiabilité qui est une préoccupation essentielle dans les marchés libéralisés une grande fiabilité implique des coûts d'investissement et de maintenance [9]. Mais la DG représente aussi une bonne occasion de marketing car il a le potentiel pour remplir des niches clients qui recherchent leur meilleur service adapté sur les marchés saturés où la différenciation est nécessaire. De plus, les marchés sont par nature dynamique et la DG est bien adapté pour répondre à cette caractéristique: il peut être assemblé partout, avec des sources diversifiées, dans un temps très court, exploités immédiatement et séparément, avec une taille qui peut être augmentée ou diminuée et avec la possibilité de suivre et de suivre les fluctuations inévitables du marché [13].

Jusqu'à présent, les développeurs et les opérateurs DG sont essentiellement concernés par la production d'énergie à partir de leurs unités, mais, sur la base des incitations génériques actuelles, pas motivés à fournir des services liés à la sécurité du système [17]. Cet effet de levier à la pénétration DG permet, à côté des avantages de la société et du système électrique, pour augmenter l'expérience opérationnelle avec la connexion de la DG et plus particulièrement celles qui sont fondées sur des sources renouvelables. Une comparaison des coûts actuels et futurs par rapport à la structure des revenus est présentée dans la figure. 1.4. Il montre clairement et attendu l'évolution à une réglementation des unités DG en tant que joueurs actifs.

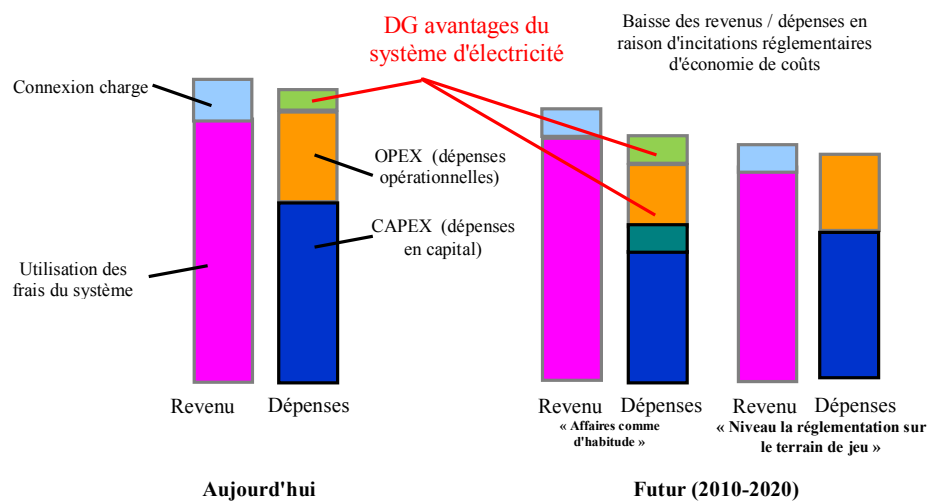


Figure. 1.4 : Économie de DSO [24].

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

Dans [7], il est suggéré que l'utilisation de textes réglementaires pourraient façonner les bénéficiaires DSO et donc à inciter les DSO à devenir plus efficace qui se traduira par des tarifs de réseaux futurs inférieurs. Le tableau 1.2 présente une vue d'ensemble des avantages et des inconvénients pour le système électrique qui résulte de la connexion aux réseaux DG.

Tableau. 1.2 : Coûts et avantages pour le système d'électricité induite par la DG [7].

	DG peut créer des avantages pour le système d'électricité:	DG peut créer des coûts pour le système d'électricité:
liés au réseau	<p>- <i>Report du coût de la capacité de distribution</i>: le développement de petites installations de DG à proximité d'une charge peut retarder les investissements nécessaires dans des capacités de distribution et de transport supplémentaires de manière absolue ou temporaire. DSO, peut bénéficier de ces nouvelles installations de la DG, car il peut réduire leurs coûts d'investissement de distribution de l'électricité différent des installations dans les «zones à coûts élevés» peuvent réduire les coûts pour DSO.</p> <p>- <i>Économie des coûts opérationnels</i>: la production distribuée peut réduire les coûts d'exploitation et de maintenance des valeurs du système de distribution en ce qui concerne les coûts d'ingénierie, notamment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction des pertes • Support de tension • Extension de la durée de vie de l'équipement de soutien à la puissance réactive. <p>- <i>Soulagement de la congestion</i>.</p> <p>- <i>Amélioration de la fiabilité</i>: à travers le relief du réseau et donc une probabilité plus faible de pannes ou de baisses de tension.</p>	<p>- <i>Coûts de raccordement</i> : la connexion de l'usine de la DG au réseau de distribution entraîne des dépenses concernant les lignes de connexion et la mise à niveau du réseau, en fonction de l'emplacement de l'installation DG. Lors du choix de l'emplacement d'une installation DG à proximité d'une grille existante peut réduire les coûts de connexion.</p> <p>- <i>Coûts de comptage</i> : Le comptage de la production de DG présente un coût qui est alloué en dehors du réseau et peut être attribué à l'opérateur de la DG Les coûts d'un système de gestion et de contrôle qui collecte automatiquement les données de mesure et fournit des signaux de contrôle attribués au DSO.</p> <p>- <i>Coûts de mise à niveau et d'extension des réseaux</i>: induits par les usines de la DG</p> <p>- <i>Coûts pour les efforts de planification supplémentaires</i>.</p> <p>- <i>Coûts de transaction</i> (par exemple frais d'administration, etc.)</p>
Liées à l'énergie	<p>- <i>Contributions à la réduction de la charge (maximale)</i>: pour sauvegarder la capacité et équilibrer la puissance.</p> <p>- <i>Valeurs d'options flexibles</i> (par exemple, temps de chargement courts pour DG, contribution à la puissance d'équilibrage, etc.)</p> <p>- <i>Amélioration de la sécurité de l'approvisionnement</i> (par exemple par le biais de systèmes TIC et / ou de meilleures prévisions).</p> <p>- <i>Évitement de la surcapacité</i>: éviter les surcapacités ou au moins la réduction des marges de réserve par rapport à des systèmes plus centralisés. Dans les systèmes électriques traditionnels, une demande croissante d'électricité a été résolue en installant une nouvelle centrale électrique centrale. Dans l'environnement de marché d'aujourd'hui surdimensionnement des centrales électriques peut être un investissement risqué. Les usines à petite échelle DG sont mieux équipées pour répondre aux changements de la demande à court terme.</p>	<p>- <i>les coûts de réserve</i>: lors de l'installation d'une grande capacité de sources DG intermittentes (par exemple, des éoliennes et des générateurs PV), une certaine réserve de courant doit être disponible. Cela peut être une autre source DG (illustrant que DG peut agir comme une capacité de réserve également) ou une source centralisée. La DG «contrôlable», telle que les centrales de cogénération qui peuvent fonctionner indépendamment de la demande de battement, peut contribuer à la capacité de réserve.</p> <p>- <i>les coûts d'équilibrage</i>: une puissance d'équilibrage supplémentaire pourrait être nécessaire en raison du caractère intermittent de certaines sources de DG (telles que les systèmes éoliens ou PV). Généralement, La capacité d'équilibrer le système de distribution dépend de la façon dont une installation de production de DG est contrôlable et peut présenter un fardeau ou un avantage pour le système de distribution.</p> <p>- <i>Coûts pour les services des systèmes supplémentaires</i>.</p> <p>- <i>coûts de contrôle</i>: dans le cas des centrales DG contrôlables</p>

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

L'utilisation du concept de comptage net peut également encourager les investissements des consommateurs dans les méthodes alternatives de production d'énergie comme la DG tout en utilisant utilitaires classiques [25]. Il leur offre un remboursement immédiat et peut tirer parti de la croissance des petits systèmes d'énergie [26] qui sont fondamentales pour englober le stockage. Quelques tendances croissantes dans le domaine DG peuvent être décrites [27], [28]:

- Prix en temps réel en fonction de son coût marginal ;
- Payants performance incitatives ;
- Procédures d'exploitation d'urgence régionale ;
- Nouvelles mesures incitatives que les besoins.

1.4. Les nouvelles architectures de réseau

Le thème des nouvelles architectures pour les réseaux électriques est l'objet d'un grand nombre de documents publiés. En opposition aux réseaux de transport, la conception du réseau classique au réseau de distribution a conduit à des structures de contrôle et de gestion moins sophistiqués et faible au niveau d'automatisation. L'augmentation des connexions DG et actifs vieillissants nécessite des stratégies et des technologies de réseaux plus actifs au niveau de la distribution [29]. Outre l'accès physique au réseau, DG fait face à un problème d'accès au marché du négoce d'énergie, comme jour à l'avance [7]. Avec de petites unités DG le problème est encore pire que, en plus de règles d'accès, ils ont un problème d'échelle non seulement du pouvoir mais aussi économique. La restriction de l'accès aux marchés par de petites unités de production d'énergie est compréhensible car il serait pratiquement impossible de gérer des milliers de ces petites unités. La solution implique probablement l'agrégation de petites ou moyennes unités permettant d'agir comme un gros générateur et d'être compétitifs par rapport aux grandes installations de production classiques [26].

La séparation du contrôle opérationnel et la propriété est un principe important qui pourrait améliorer la flexibilité des systèmes électriques à travers la coordination des unités multiples. L'utilisation de l'agrégation pourrait permettre à la non-discrimination à l'encontre de toute technologie de génération spécifique par les opérateurs de réseau qui est particulièrement important pour les marchés d'équilibrage et de réserve. En fait et selon les règles actuelles, les contrats opérateurs de tels services habituellement avec des

quantités minimum 1 MW [30].

Il y a déjà un travail développé sur les schémas d'agrégation tels que Microgrids a montré à la figure. 1.5. L'ancienne génération et des charges englobe et comme une portée géographique. Il peut être utilisé dans un mode de réseau connecté ou îlotage. Ce dernier englobe génération seulement et a une portée commerciale [17], [31].

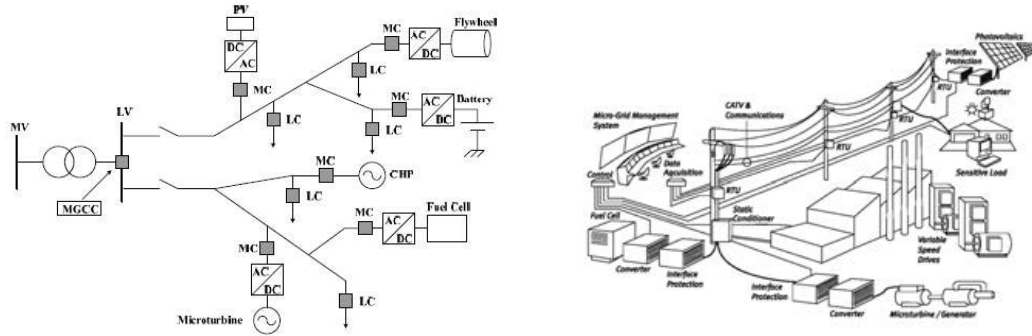


Figure. 1.5 : Exemple d'un Microgrid [32].

L'avantage du concept Microgrid est la capacité de fonctionner même quand il n'est pas connecté au réseau, comme dans le cas de défaillance du réseau, en fournissant une continuité locale pour les charges qu'elle dessert. Outre la question de l'agrégation, un concept plus générique est le concept de réseau intelligent qui vise à prévoir les futurs réseaux. Smart Grid est un concept relativement nouveau qui souligne à l'application des technologies de l'information aux systèmes d'alimentation [33-35]. Bien que pas significativement différent de réseaux électriques conventionnels réels, cela signifie conduire à un coût plus avantageux et à l'efficacité [36,37].

1.5. Les questions relatives aux énergies renouvelables

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les ressources énergétiques renouvelables sont des ressources qui ne sont généralement pas soumis à l'épuisement. De telles ressources peuvent être chaleur et la lumière du soleil, de la force du vent, de la matière organique (biomasse), chute d'eau (hydrique), l'énergie de l'océan et la chaleur géothermique [8].

1.5.1. Évolution de l'énergie renouvelable et leurs applications

Les sources d'énergie renouvelables sont des atouts précieux lors de l'examen de leur disponibilité « de nulle part » (indépendance énergétique, la collecte décentralisée) et le coût libre (économie). Il est prévu une croissance de la production d'énergie renouvelable pour les années à venir, avec un scénario de référence mis au point pour

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

montrant une augmentation de production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération) et systèmes d'énergie renouvelable (RES) jusqu'à 36% en 2030 [1]. Un pronostique de l'approvisionnement en énergie renouvelable à 100% sur la base des ressources domestiques, même être physiquement possible [38,39]. La figure. 1.6 présente le passé et les coûts prévus pour les technologies des énergies renouvelables qui soutiennent l'idée d'une croissance de production d'énergie renouvelable.

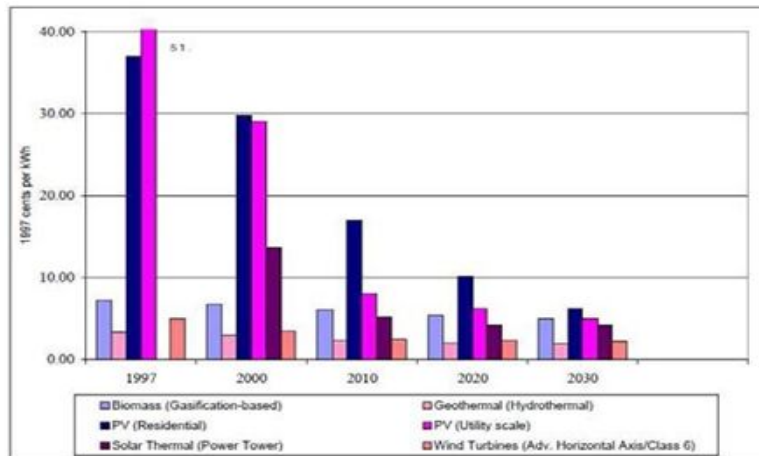
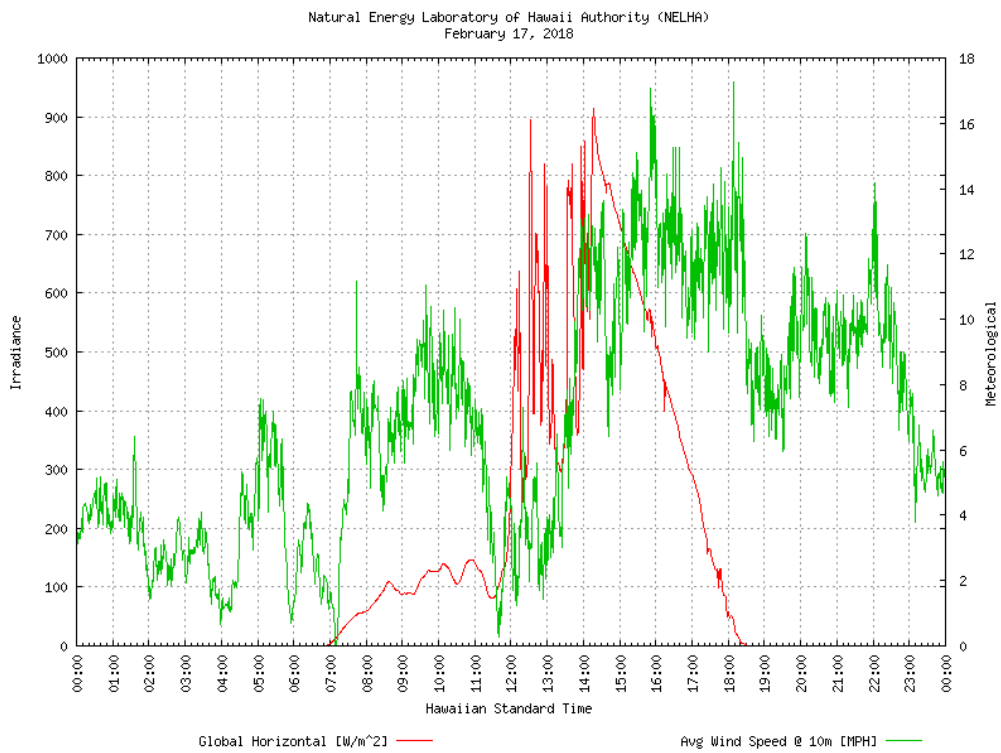
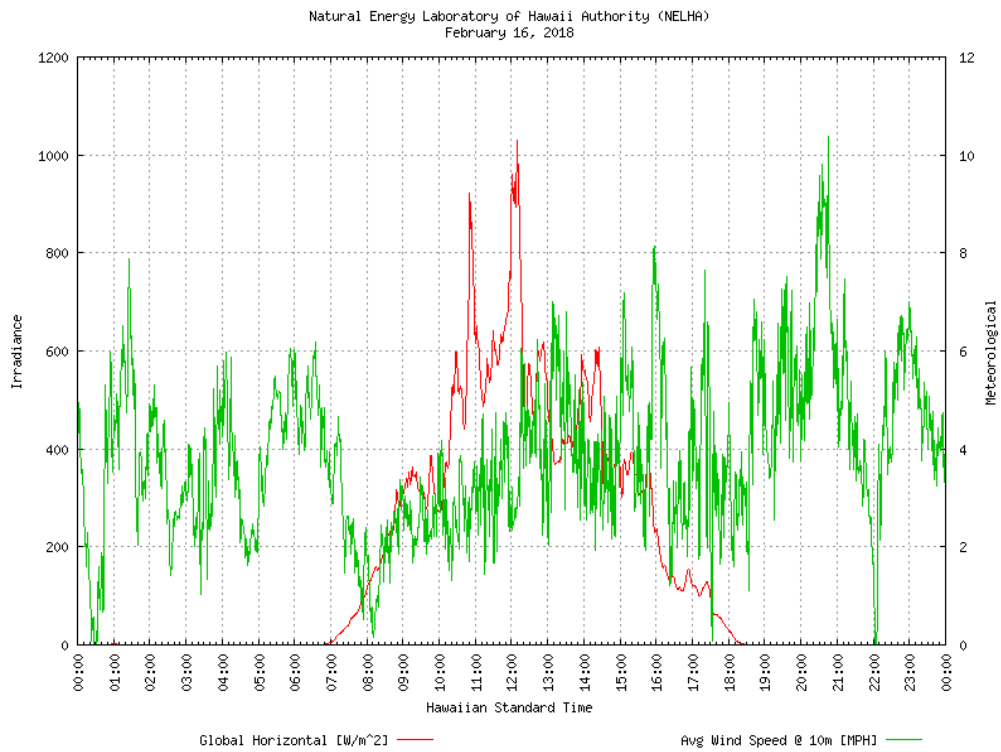


Figure. 1.6 : Coût des prévisions de l'électricité pour les technologies des RES [40].

Des niveaux de pénétration des RES, à savoir celles basées sur le vent, commencent à porter atteinte à l'intégrité et à la sécurité du système électrique en raison de cette stratégie qui a été utilisée jusqu'à présent. Néanmoins, les sources renouvelables peuvent contribuer à aggraver les problèmes de coordination de la congestion et de la protection du réseau. En effet, la variabilité des ressources primaires comme le vent et le soleil (figure. 1.7) entraînent des variations significatives d'énergie et scintillement si elles restent sans contrôle. Le soleil est également une source variable, lorsque la puissance recueillie peut rapidement chuter de 60% provoque des variations brutales de tensions de nœud qui ne sont pas un problème si la densité de connexion est faible, mais peut devenir grave dans le cas inverse, en particulier dans le cas de connexion à de longues lignes de distribution [41,42]. La correspondance entre la génération de puissance de crête de PV et les réseaux de consommation n'est pas normalement remplie [43]. Cependant, il y a parfois une coïncidence de la consommation électrique d'un certain type de charges (commercial par exemple) que le pic en début d'après-midi. Dans ces cas, la production totale de PV dans un système de services publics peut contribuer à réduire la charge de pointe du réseau, même si elle peut avoir aucun impact sur la charge de pointe à la résidence où le PV est installé [22].

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes



CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

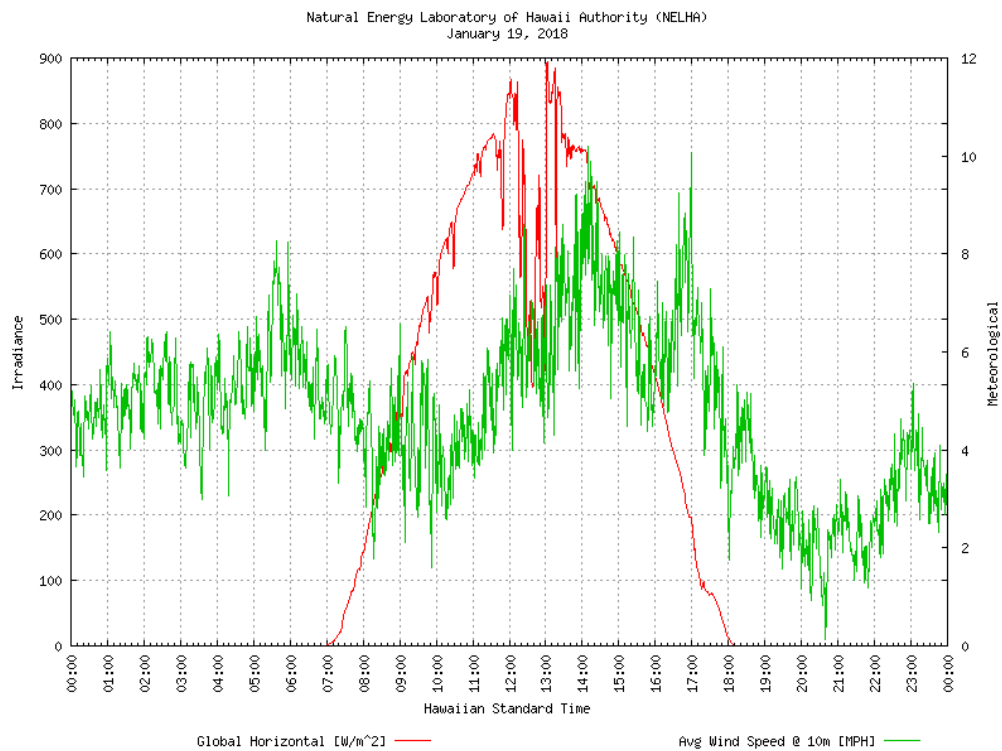
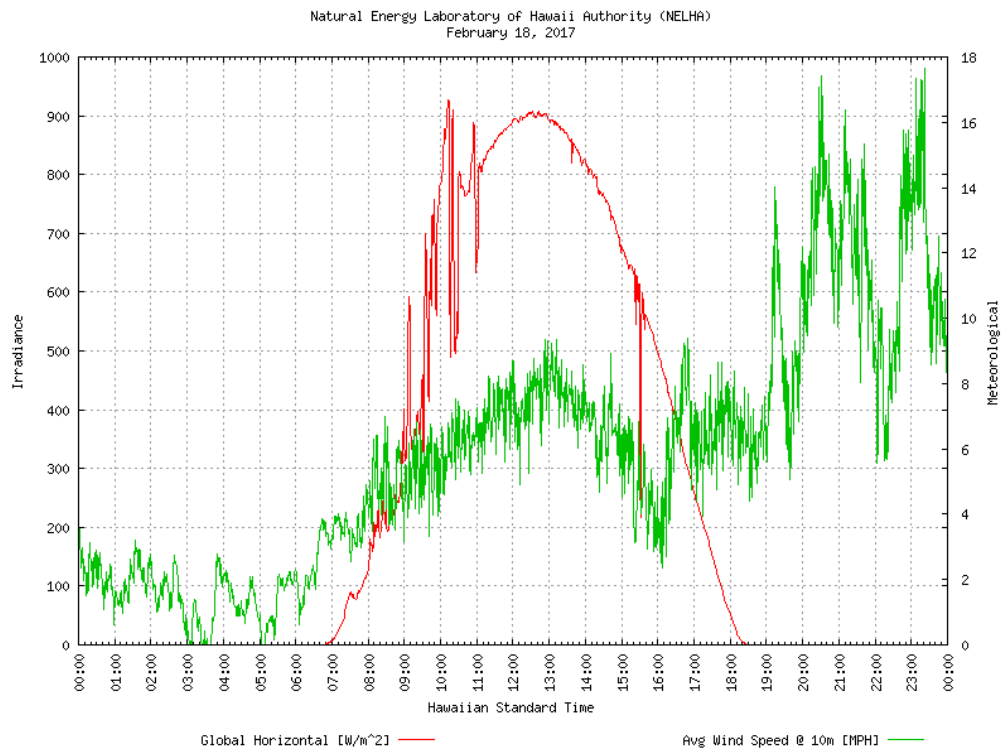


Figure. 1.7 : Exemple de profil du vent et de rayonnement pendant six quatre jours
[<http://www.nrel.gov/midc/apps/go2url.pl?>].

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

Ainsi, la production renouvelable ajoute une incertitude significative à la gestion des systèmes d'alimentation car ils sont extrêmement dépendants des prévisions précises pour l'équilibre de puissance entre la production et la consommation. De plus, les systèmes de production d'énergie renouvelable alimentent habituellement leur puissance maximum instantanée, pour obtenir un effet de levier économique [11]. Un exemple de ces problèmes de connexion est la question économique de considérer l'expansion de la nouvelle capacité de transmission pour accueillir 60 jours forts vents en un an [3]. Par conséquent, la connexion incontrôlée de production d'énergie renouvelable se traduit directement par des problèmes de qualité, de la fréquence et des variations de tension ou de gestion de flux d'énergie bidirectionnel [15;18;44].

Même en considérant que la connexion des générateurs avec différentes entrées de sources renouvelables peut atténuer les problèmes de la puissance injectée dans le réseau qui ne résout pas tous les problèmes. . La figure. 1.8 représente la puissance délivrée au réseau pour un générateur de vent combiné un système solaire où l'on peut voir les variations non seulement dans les hautes fréquences mais aussi dans les basses fréquences. Les problèmes de connexion au réseau liés aux sources d'énergie renouvelables stochastiques peuvent être traitées par une combinaison de gestion de la charge et de stockage à condition que la dimension de l'unité génératrice de pas très grand, car il est difficile de stocker de grandes des quantités d'énergie électrique [30;34;42].

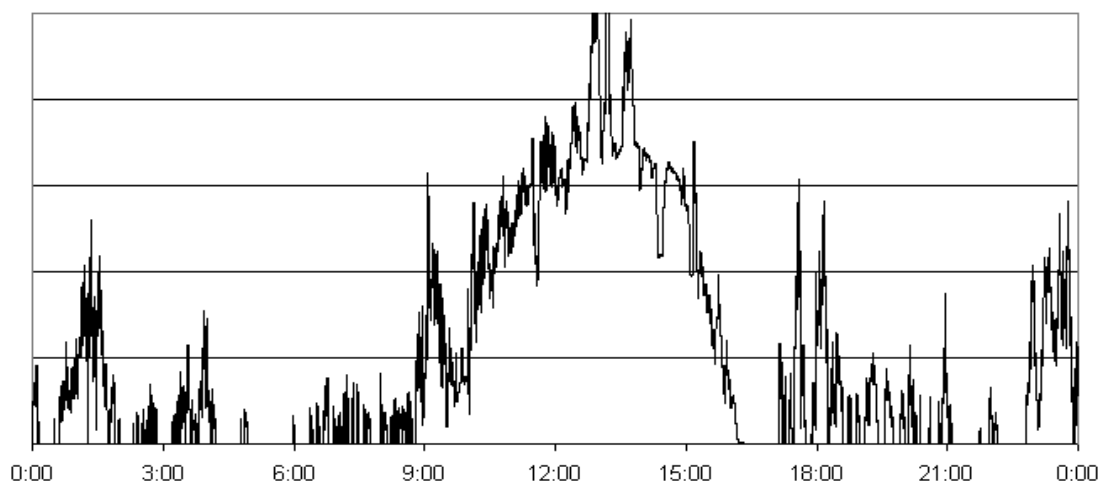


Figure. 1.8 : Exemple de combinaison d'énergie incontrôlée éolienne/photovoltaïque.

1.5.2. Stockage et hybridation

Le stockage peut être acheté pour permettre un meilleur fonctionnement des parties localisées du système d'alimentation ou même de l'utiliser pour soutenir le système d'alimentation dans son ensemble. Sinon, le stockage peut provenir d'un arrangement électrique au réseau, avec un accord sur la fréquence du système pour le cycle des batteries [45,46]. Un autre type de solution réside dans l'utilisation de l'hybridation et compensation de la faiblesse de l'un avec la force de l'autre que ce soit dans les sources que ce soit dans le stockage ou même dans le vecteur d'énergie [16]. Un point de vue économique est également pertinent pour l'analyse de l'utilisation des sources renouvelables. La figure. 1.9 montre la corrélation entre les prix du marché et la production éolienne place où l'on peut remarquer que la diminution de la production éolienne fait monter les prix et l'augmentation la production éolienne entraîne une baisse des prix. Ce comportement appelle à RES qui peuvent être contrôlables, non seulement de contourner ce problème, mais aussi pour être en mesure de prendre un avantage économique de la variation des prix [18].

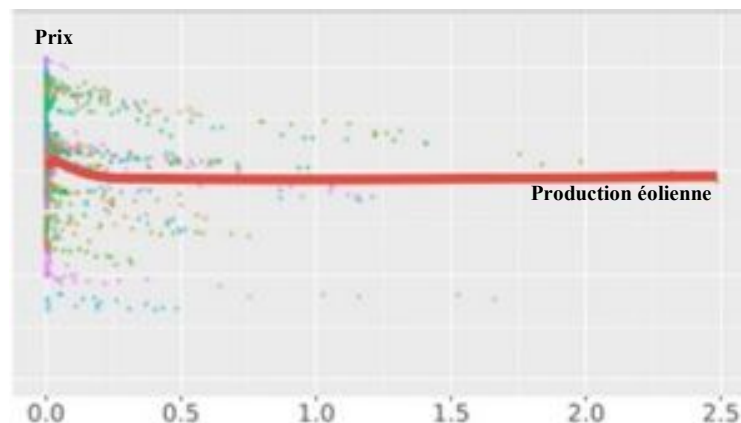


Figure. 1.9 : Corrélation entre les prix du marché et la production éolienne.

Les sources hybrides est une combinaison de deux ou plus des sources d'énergie et de puissance, a été un sujet de recherche depuis les années 90 [43]. Il existe des technologies de stockage multiples disponibles, tels que: la biomasse ; Pile à combustible à hydrogène ; hydro base ; stockage d'énergie à air comprimé (CAES) ; pompe à chaleur ; redox cellule d'écoulement ; batteries électrochimiques (Pb, Li, ...) ; volant ; supraconducteur de stockage d'énergie magnétique (PME) ; condensateur. D'autre part, il y a plusieurs façons de catégoriser les technologies de stockage, l'un d'entre eux, ce qui est intéressant pour le contexte actuel, est basée sur les propriétés du

temps tel que présenté dans le tableau. 1.3

Tableau. 1.3: Applications et durée des technologies de stockage [46].

durée de stockage de pleine puissance	Application du stockage et remplacement éventuel des commandes conventionnelles du système électrique	Biomasses	Hydrogène, électrolyse + pile à combustible	Grand-hydro	Stockage de l'énergie de l'air comprimé (CAES)	magasin de chaleur ou de froid + pompe à chaleur	Hydro pompé	Cellules d'écoulement Redox	Nouvelles et anciennes technologies de batteries	volant
4 moins	Lissage annuel des charges, PV, vent et petite hydraulique	✓	✓	✓						
3 semaines	lissage des effets météorologiques: charge, PV, le vent, les petites centrales hydroélectriques	✓	✓	✓						
3 jours	Lissage hebdomadaire des charges et de la plupart des variations météorologiques	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
8 heures	Cycle de chargement quotidien, PV, ligne de transmission de vent, réparation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
2 heures	Élevage de charge de pointe; marche arrière, lissage du vent; minimisation de NETA ou pénalités commerciales similaires	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
20 minutes	Réserve de rotation, l'énergie éolienne lissant les nuages sur PV		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3 minutes	Spinning inverse vent puissance de lissage des rafales		✓				✓	✓	✓	✓
20 secondes	Défaut de ligne ou défaut local Contrôle de tension et de fréquence commandé par le régulateur							✓	✓	✓

La tâche principale d'une unité de stockage est d'insérer la flexibilité dans la manipulation de l'énergie électrique que la possibilité de faire varier rapidement le pouvoir réel où le stockage peut jouer un rôle important [26]. Les technologies de stockage sont candidats donc excellents pour surmonter la variabilité des sources renouvelables, compensant l'excédent ou le déficit de la maximisation puissance générée par la consommation de la charge [47]. La connexion au réseau peut également bénéficier de stockage dans les systèmes flexibles de transmission AC souples (FACTS) dispositifs fournissant des services tels que l'absorption / injection puissance active et réactive indépendante sur / à partir de réseau, ce qui conduit à un contrôleur de transmission plus économique et / ou flexible [15]. D'autres avantages du stockage, liés à [5], sont impliqués dans la déréglementation, ainsi que des limitations de transmission et déficit de production qui ont récemment changé la condition du réseau électrique. Ceux-ci sont liés à la fiabilité et la qualité de puissance du système. La capacité d'amortir rapidement les oscillations, de répondre à des changements brusques de la charge, l'alimentation de charge pendant les interruptions de transmission ou de distribution, corriger les profils de tension de charge avec régulation de la puissance

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

réactive rapide, et permettent encore les générateurs à l'équilibre avec la charge du système à leur vitesse normale. Cependant, tandis que le stockage est perçu comme une bonne option pour contrôler l'énergie renouvelable il y a encore des problèmes liés à leur utilisation, fondamentalement la relation coûts-puissance de l'énergie. Le tableau. 1.4 donnent un aperçu des avantages et des inconvénients pour certaines technologies liées au stockage.

Tableau. 1.4 : Avantages et inconvénients des technologies de stockage [48].

Les technologies	avantages	Inconvénients	Améliorations potentielles	
<i>Stockage d'énergie des aimants supraconducteurs (SMES)</i>	Haute densité de puissance.	Densité énergétique faible. Besoins auxiliaires élevés. Technologie coûteuse.	Réduction des coûts. Densité d'énergie plus élevée. Vitesse de changement plus élevée.	
<i>Supercapaciteurs</i>	Haute densité de puissance. Long cycle de vie. Recharge très rapide.	Densité énergétique faible. Nécessite une électronique de puissance avancée. Technologie coûteuse.	Réduction des coûts. Densité d'énergie plus élevée.	
<i>Technologies de batterie</i>	<i>Plomb-acide</i>	Technologie mature. Familier. Peu coûteux.	Exigences de maintenance élevée. Faible densité d'énergie Faible densité de puissance Cycle de vie court. Dangers environnementaux. Haute tension de décharge profonde La capacité dépend de l'augmentation de la température.	Profondeur de décharge. Performance à basses températures ambiantes.
	<i>Sodium-soufre (NaS)</i>	Densité de puissance élevée. Densité d'énergie plus élevée. Haute efficacité. Technologie mature.	Technologie coûteuse Température élevée de travail.	Moindre coût
	<i>Vanadium redox (VRB)</i>	Densité de puissance élevée. Densité d'énergie plus élevée. A utiliser dans d'énormes applications.	Technologie de stade précoce. Technologie coûteuse Standardisation robuste	Moindre coût Processus de normalisation d'amélioration.
	<i>Zinc-brome (Zn-Br)</i>	Densité de puissance élevée. Densité d'énergie plus élevée. A utiliser dans d'énormes applications.	Technologie de stade précoce. Coût élevé de maintenance. Composants toxiques Composants corrodables rapidement	Moindre coût Amélioration du système de contrôle et de supervision
	<i>Lithium-ion (Li-ion)</i>	Densité de puissance élevée. Densité d'énergie plus élevée. Haute efficacité.	Technologie de stade précoce. Technologie coûteuse Exploration difficile	Moindre coût Amélioration du système de contrôle et de supervision Amélioration des gradients de température indépendants.
	<i>NickelCadium (Ni-Cd)</i>	Technologie mature. Haute résistance mécanique.	Technologie coûteuse. Composants toxiques.	Moindre coût Amélioration du processus

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

		Densité d'énergie plus élevée. Long cycle de vie		de recyclage.
	<i>Nickel-metal-hydrure (NiMH)</i>	Technologie mature. Haute résistance mécanique. Densité d'énergie plus élevée. Long cycle de vie Moins de composants toxiques en comparaison avec les batteries NI-CD	Technologie coûteuse.	Moindre coût Amélioration du processus de recyclage.
	<i>Piles à combustible</i>	Systèmes de cogénération à rendement relativement élevé (piles à combustible à haute température)	Technologie coûteuse Production de carburant difficile Sensible sur les composés soufrés. Décharge la capacité.	Moindre coût
	<i>Hydro pompé</i>	Densité de puissance élevée. Densité d'énergie plus élevée. Technologies mature.	Géographique limité. Cher de site et de construire. Long temps de construction A utiliser dans d'énormes applications	Efficacité de la turbine
	<i>Air-comprimé (CAES)</i>	Densité de puissance élevée. Densité d'énergie plus élevée. Technologies mature.	Géographique limité. Cher de site et de construire. Long temps de construction A utiliser dans d'énormes applications Requiert l'apport de carburant	Capacité adiabatique (nécessite un stockage thermique)
	<i>Volant</i>	Densité de puissance plus élevée Long cycle de vie Recharge très rapide	Faible densité d'énergie Pertes importantes en attente	Réduction des coûts Densité de puissance plus élevée

1.6. Conclusion

Ce chapitre se focalise sur le secteur de l'énergie et les technologies modernes, et en particulier sur le renouvelable. Il examine le moyen de coordonner automatiquement les producteurs d'énergie avec les consommateurs pour permettre aux fournisseurs d'avoir plus de souplesse quant à la gestion de leurs installations pour mieux intégrer l'impact environnemental. Le chapitre qui suit présente la chaîne fondamentale de production d'énergie d'origine renouvelable avec les topologies possible.

1.7. Bibliographie

- [1] Chevalier, J M, and J Percebois. "Gas and Electricity: A Challenge for Europe."
- [2] Dondi, Peter et al. "Network Integration of Distributed Power Generation." *Journal of power sources* 106.1–2 (2002): 1–9.
- [3] Costa, Luís Miguel. "Scheduling of Power System Cells Integrating Stochastic Power Generation." 2008.
- [4] Gungor, Vehbi C et al. "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards." *IEEE transactions on Industrial informatics* 7.4 (2011): 529–539.
- [5] Ribeiro, Paulo F et al. "Energy Storage Systems for Advanced Power Applications." *Proceedings of the IEEE* 89.12 (2001): 1744–1756.
- [6] Amin, S Massoud, and Bruce F Wollenberg. "Toward a Smart Grid: Power Delivery for the 21st Century." *IEEE power and energy magazine* 3.5 (2005): 34–41.
- [7] Montez, J P, ECOGEN F Knecht, and T Bouquet. "ELEP–EUROPEAN LOCAL ELECTRICITY PRODUCTION." (2005).
- [8] Ackermann, Thomas, Göran Andersson, and Lennart Söder. "Distributed Generation: A definition1." *Electric power systems research* 57.3 (2001): 195–204.
- [9] Wachenfeld, V. "Inverters Supporting Electrical Grid Stability through Active and Reactive Power Control." *The 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Held in Valencia, Spain, in September*. N.p., 2008.
- [10] El-Khattam, Walid, and Magdy M A Salama. "Distributed Generation Technologies, Definitions and Benefits." *Electric power systems research* 71.2 (2004): 119–128.
- [11] Buchholz, Bernd Michael, and Zbigniew A Styczynski. "Integration of Renewable and Dispersed Resources: Lessons Learnt from German Projects." *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*. IEEE, 2006. 6–pp.
- [12] Darrow, Ken et al. "The Role of Distributed Generation in Power Quality and Reliability." *New York State Energy Research and Development Authority* (2005).
- [13] Patsios, C et al. "Control and Analysis of a Hybrid Renewable Energy-Based Power System." *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*. IEEE, 2010. 1–6.
- [14] Momoh, James A. "Smart Grid Design for Efficient and Flexible Power Networks Operation and Control." *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES*. IEEE, 2009. 1–8.
- [15] Lund, Per et al. "Connection of Distributed Generation–effect on the Power System." *SINTEF Energy Research, Norway* (2003).
- [16] Blarke, Morten Boje, and Henril Lund. "The Effectiveness of Storage and Relocation Options in Renewable Energy Systems." *Renewable Energy* 33.7 (2008): 1499–1507.
- [17] Coster, Edward, Johanna Myrzik, and Wil Kling. "Effect of DG on Distribution Grid Protection." *Distributed Generation*. InTech, 2010.
- [18] Moore, Don A, and Paul J Healy. "The Trouble with Overconfidence." *Psychological review* 115.2 (2008): 502.
- [19] Farhangi, Hassan. "The Path of the Smart Grid." *IEEE power and energy magazine* 8.1 (2010): n. pag.
- [20] Purchala, K et al. "Distributed Generation and the Grid Integration Issues." *Imperial College London, UK, EUSUSTEL, Work Package 3* (2006).
- [21] Whitaker, Chuck et al. "Distributed Photovoltaic Systems Design and Technology Requirements." *Sandia/SAND2008-0946 P, Tech. Rep* (2008).

- [22] Vu Van, Thong, and Ronnie Belmans. "Distributed Generation Overview: Current Status and Challenges." *International Review of Electrical Engineering (IREE)* 1.1 (2006): 178–189.
- [23] Nema, Pragma, R K Nema, and Saroj Rangnekar. "A Current and Future State of Art Development of Hybrid Energy System Using Wind and PV-Solar: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13.8 (2009): 2096–2103.
- [24] Gellings, Clark W, and Richard J Lordan. "The Power Delivery System of the Future." *The Electricity Journal* 17.1 (2004): 70–80.
- [25] Scheepers, M J J. "Policy and Regulatory Roadmaps for the Integration of Distributed Generation and the Development of Sustainable Electricity Networks." *Final Report of the SUSTELNET project, ECN Report ECN-C-04-034* (2004).
- [26] Chuang, Cheng-Long et al. "An Adaptive PMU-Based Fault Location Estimation System with a Fault-Tolerance and Load-Balancing Communication Network." *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne. IEEE, 2007.* 1197–1202.
- [27] McDonald, Jim. "Adaptive Intelligent Power Systems: Active Distribution Networks." *Energy Policy* 36.12 (2008): 4346–4351.
- [28] Kempton, Willett, and Jasna Tomić. "Vehicle-to-Grid Power Fundamentals: Calculating Capacity and Net Revenue." *Journal of power sources* 144.1 (2005): 268–279.
- [29] Chen, Zhenwei. "Virtual Power Plant Simulation and Control Scheme Design." 2012.
- [30] Lopes, J A Peças, C L Moreira, and A G Madureira. "Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation." *IEEE Transactions on power systems* 21.2 (2006): 916–924.
- [31] Brooks, Alec, Tom Gage, and A C Propulsion. "Integration of Electric Drive Vehicles with the Electric Power Grid—a New Value Stream." *18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Berlin, Germany.* Citeseer, 2001. 20–24.
- [32] Brooks, Alec, Tom Gage, and A C Propulsion. "Integration of Electric Drive Vehicles with the Electric Power Grid—a New Value Stream." *18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Berlin, Germany.* Citeseer, 2001. 20–24.
- [33] Potter, Cameron W, Allison Archambault, and Kenneth Westrick. "Building a Smarter Smart Grid through Better Renewable Energy Information." *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES. IEEE, 2009.* 1–5.
- [34] Inage, Shin-ichi. "Modelling Load Shifting Using Electric Vehicles in a Smart Grid Environment." (2010).
- [35] Kleinkauf, W et al. "Decentralized Grid-Compatible PV Power Supply-Strategy for Electrification and Integration Concepts with Modular Technology." *2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien (Österreich).* Vol. 6. N.p., 1998.
- [36] Dollen, D V. "Enabling Energy Efficiency IntelliGrid." *2006 NARUC Summer Meeting.* N.p., 2006.
- [37] Lund, Henrik, and Brian Vad Mathiesen. "Energy System Analysis of 100% Renewable Energy systems—The Case of Denmark in Years 2030 and 2050." *Energy* 34.5 (2009): 524–531.
- [38] Herzog, Antonia V, Timothy E Lipman, and Daniel M Kammen. "Renewable Energy Sources." *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Forerunner Volume-Perspectives and Overview of Life Support Systems and Sustainable Development* (2001).
- [39] Holttinen, Hannele et al. "State-of-the-Art of Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power: Summary of IEA Wind Collaboration." *EWECE 2007-European Wind Energy Conference & Exhibition.* N.p., 2007. 1–11.
- [40] Baggini, Angelo. *Handbook of Power Quality.* John Wiley & Sons, 2008.
- [41] Woyte, Achim et al. "Voltage Fluctuations on Distribution Level Introduced by Photovoltaic Systems." *IEEE Transactions on energy conversion* 21.1 (2006): 202-209.

CHAPITRE 1 Contexte de la production d'énergie renouvelable et de nouveaux paradigmes

- [42] Wang, H X et al. “Optimum Inverter Sizing of Grid-Connected Photovoltaic Systems Based on Energetic and Economic Considerations.” *Renewable Energy* 118 (2018): 709–717.
- [43] de Alegría, Iñigo Martínez et al. “Connection Requirements for Wind Farms: A Survey on Technical Requierements and Regulation.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11.8 (2007): 1858–1872.
- [44] Celik, A N. “Optimisation and Techno-Economic Analysis of Autonomous Photovoltaic–wind Hybrid Energy Systems in Comparison to Single Photovoltaic and Wind Systems.” *Energy Conversion and Management* 43.18 (2002): 2453–2468.
- [45] Barton, John P, and David G Infield. “Energy Storage and Its Use with Intermittent Renewable Energy.” *IEEE transactions on energy conversion* 19.2 (2004): 441–448.
- [46] Paska, Józef, Piotr Biczal, and Mariusz Klos. “Technical and Economic Aspects of Electricity Storage Systems Co-Operating with Renewable Energy Sources.” *Electrical Power Quality and Utilisation, 2009. EPQU 2009. 10th International Conference on*. IEEE, 2009. 1–6.
- [47] Al-Hallaj, Said et al. “Thermal Energy Storage for Smart Grid Applications.” *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1924. AIP Publishing, 2018. 20007.
- [48] Lund, Henrik. “Renewable Heating Strategies and Their Consequences for Storage and Grid Infrastructures Comparing a Smart Grid to a Smart Energy Systems Approach.” *Energy* (2018).

*Chapitre 2 : Étude d'une chaîne de production d'origine
renouvelable*

2.1. Introduction

De nos jours, la consommation de l'énergie électrique dans le monde augmente d'une façon importante. Afin de répondre à cette demande, il faut que toutes les formes de l'énergie doivent être augmentent rapidement dans les années à venir. L'utilisation des ressources énergétiques traditionnelles telles que les combustibles fossiles n'est pas justifiable, en raison de sa pollution et des émissions de gaz à effet de serre. Pour cette raison, il y a eu un développement rapide dans le domaine de l'énergie renouvelable pour répondre à la demande énergétique, créer une économie durable de l'énergie gratuite et de réduire la pollution. Parmi les différentes façons de récolter l'énergie de la mère nature, l'énergie solaire est devenue l'une des formes dominantes en raison de sa disponibilité. Et, en plus l'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables qui doit être utilisée réellement. L'énergie cinétique est contenue dans les masses d'air en mouvement. Son utilisation se produit par la conversion de l'énergie cinétique en énergie dynamique de rotation pour produire de l'électricité.

Les sources d'énergies d'origine renouvelables peuvent être utilisées hors ligne ou en ligne. Dans les applications hors ligne, les sources fournissent des charges locales qui peuvent être résidentielles ou commerciales. Dans les applications en ligne, les source fournissent non seulement des charges locales, mais aussi sont connectés au réseau utilitaire. Dans ce cas, le système s'appellerait «système renouvelable connecté au réseau». Quelque soit pour ces deux modes de l'opération le but principale est toujours de maximisée l'énergie produite de la part de la source.

Dans ce chapitre, nous présenterons la chaîne de production d'énergie d'origine renouvelable. Pour ce faire, nous débutons avec la description de l'architecture de la chaîne et leurs modes d'opérations. Nous présentons dans un deuxième temps le modèle de la commande du système solaire photovoltaïque et le système de production éolienne avec plusieurs modes d'opération ainsi la maximisation du rendement de la chaîne. Dans la troisième partie, nous présenterons la chaîne avec source hybride photovoltaïque/éolienne avec les topologies possibles.

2.2. Chaîne d'origine renouvelable et modes d'opération

Les énergies d'origines renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres (Soleil surtout pour la chaleur et la lumière), le vent (éolienne), la Lune (marée) et la Terre (géothermie). Sa renouvelabilité dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se régénère. L'exploitation de ces sources d'énergies d'origine renouvelables possède deux modes d'opération, le mode autonome et le raccordement aux réseaux électriques.

2.2.1. Mode autonome

Les systèmes autonomes sont des unités de production d'électricité généralement de petites tailles qui ne sont reliées à aucun réseau. Ils peuvent être composés d'une ou plus de source renouvelable. Le mode d'opération autonome est utilisé pour l'alimentation des sites isolés. Il est peut être installé avec ou sans étage d'adaptation comme le montre la figure. 2.1. L'étage de l'adaptation est généralement constitué d'un convertisseur statique commandé par un algorithme utilisé pour la maximisation de la puissance produite par les sources renouvelables.

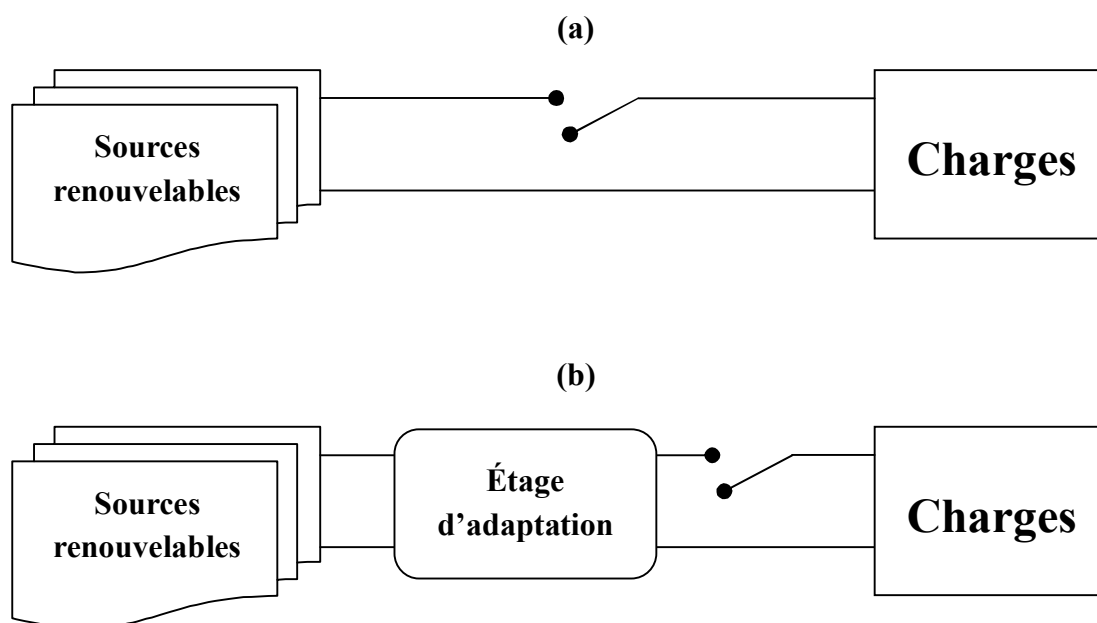


Figure. 2.1 : Mode autonome a) sans étage d'adaptation ; b) avec étage d'adaptation.

2.2.2. Raccordement au réseau

Généralement, l'un des défis des systèmes d'énergie renouvelable connectés au réseau est leur compatibilité avec l'utilitaire de réseau en raison de leurs différentes fréquences de sortie. Cet aspect soulève la question de savoir comment les intégrer dans un réseau d'utilité standard. Pour résoudre ce problème, ces systèmes doivent utiliser une sorte d'interface qui leur permet de convertir leur fréquence de sortie et d'injecter une puissance synchronisée dans le réseau. Seuls les convertisseurs statiques DC/AC et AC/AC, et ça selon la nature de la source, peut assurer cette liaison. La figure. 2.2 montre que les onduleurs connectés au réseau pour l'application du système renouvelable sont divisés en deux catégories : les onduleurs de courant et de tension [1].

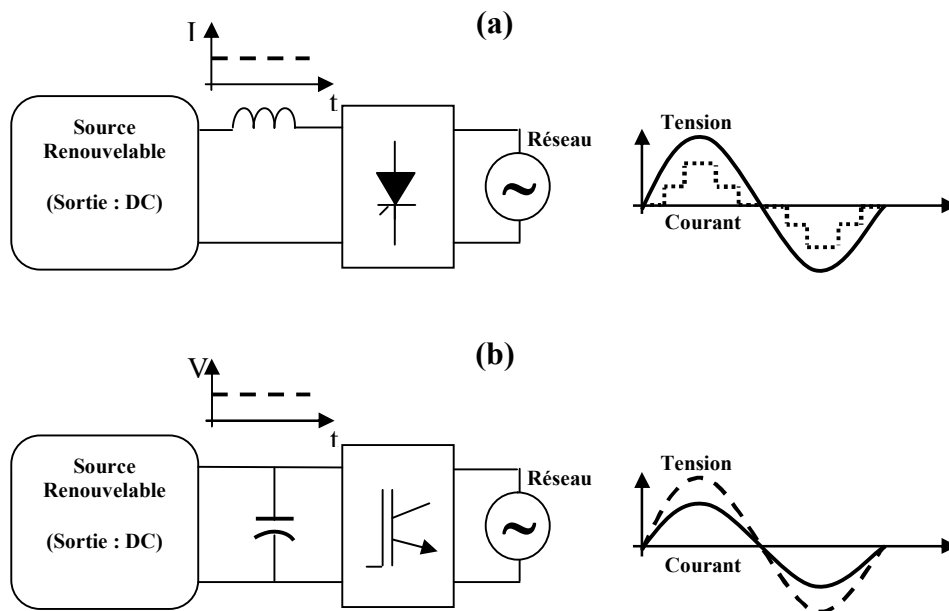


Figure. 2.2 : (a) onduleur avec source de courant ; (b) onduleur avec source de tension.

2.3. Étude d'une chaîne de production photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée [2]. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un

circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité. Ce processus ne nécessite aucun cycle thermodynamique intermédiaire, c'est-à-dire que le rayonnement est directement converti en électricité sans utilisation intermédiaire de la chaleur (contrairement au solaire thermodynamique). Généralement, l'exploitation de l'énergie convertie est en mode autonome ou elle est injectée dans un réseau électrique en utilisant un étage d'adaptation en raison d'utilisé la commande afin de maximiser l'énergie convertie. La figure. 2.3 représente une architecture de la chaîne de production et d'exploitation de l'énergie photovoltaïque.

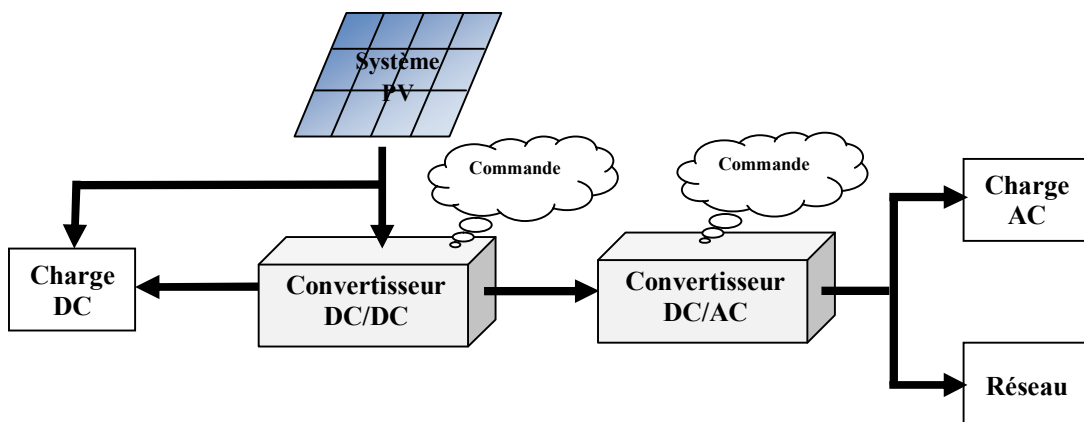


Figure. 2.3 : Chaîne de production photovoltaïque.

2.3.1. Étude de la commande en mode autonome

La figure. 2.4 montre une chaîne de production et d'exploitation photovoltaïque en mode autonome. Elle est composée d'un système de génération photovoltaïque, un convertisseur DC/DC, généralement élévateur 'boost' contrôlé par un algorithme de recherche de maximisation de la puissance 'MPPT', et une charge continue 'DC'.

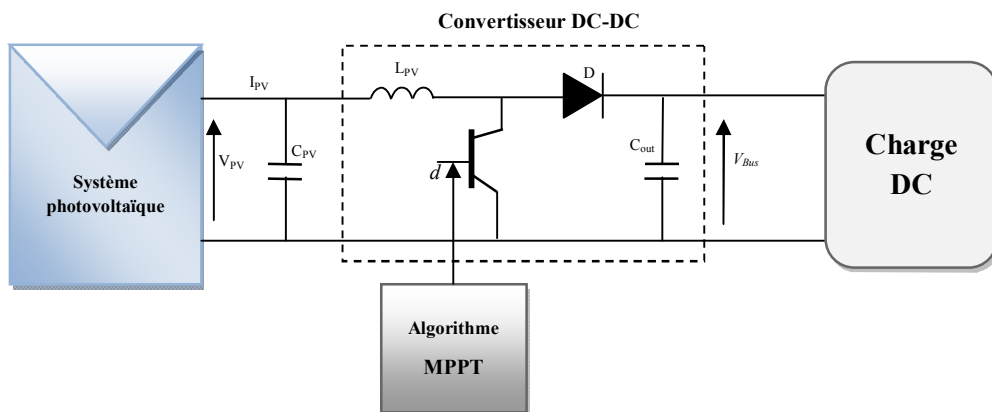


Figure. 2.4 : Chaîne de production photovoltaïque en mode autonome.

Pour obtenir un rendement élevé production de la chaîne, il est recommandé une utilisation d'un régulateur solaire MPPT *‘Maximum Power Point Tracking’*. Ce dispositif de recherche du point maximale de la puissance en modifiant la tension et l'intensité des panneaux selon l'état climatique à savoir la radiation solaire et la température. Il existe plusieurs techniques MPPT dans la littérature et l'organigramme indiqué par la figure ci-dessus représente les techniques les plus citées [3].

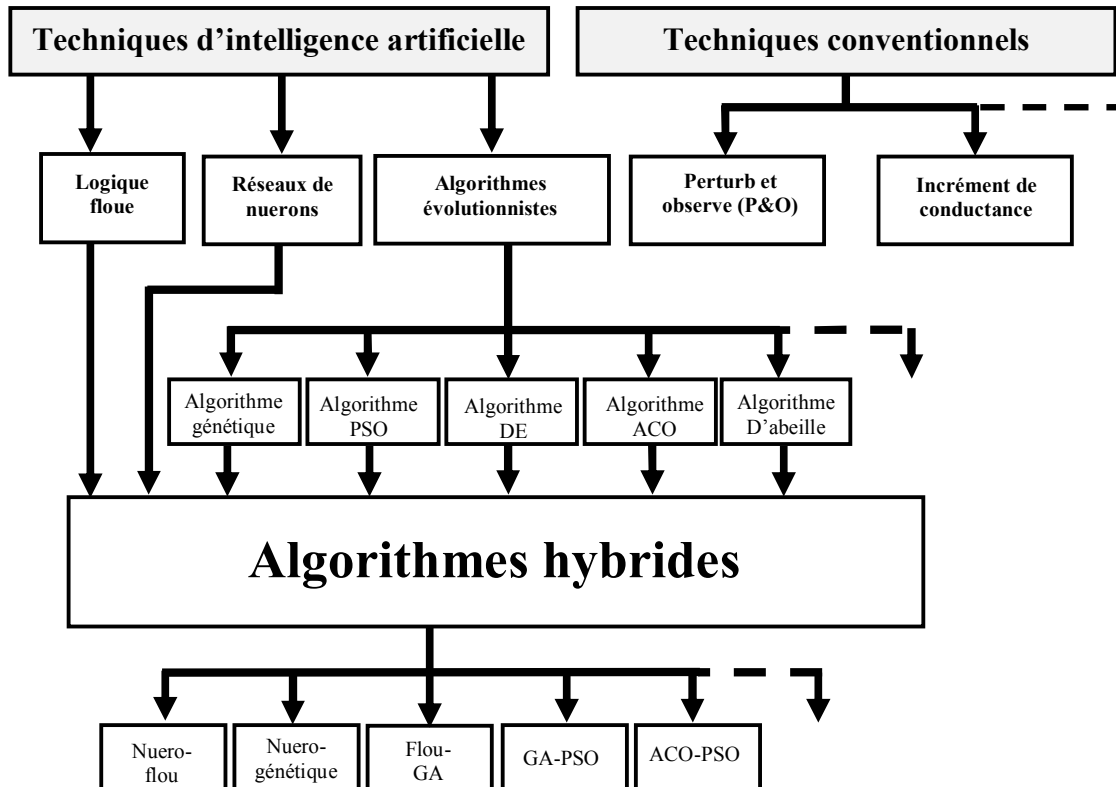


Figure. 2.5: Algorithmes MPPT pour les systèmes solaires photovoltaïques.

1) MPPT P&O

Les systèmes PV assurent la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ainsi, la vitesse de convergence est l'une des caractéristiques les plus importantes qui améliore l'efficacité, augmente le rendement et la stabilité du système [4]. D'autre part, la tension de la sortie du générateur PV n'est pas régulière et en relation avec les conditions climatiques, ce qui présente une difficulté pour l'application. Alors, le système PV ne fournit pas la sortie requise. Par conséquent, le convertisseur de puissance est nécessaire pour permettre l'utilisation de cette tension qui est non régulière. Le convertisseur DC/DC est utilisé lorsque le générateur PV fonctionne électriquement à une certaine tension qui correspond au point de puissance maximal dans différentes conditions climatiques. Pour ce faire, différentes techniques de suivi de

point de puissance maximale ont été proposées [5-8]. Un algorithme assez simple appelé perturbation et observation (P&O) fortement utilisé dans les systèmes d'énergie solaire. Cette méthode nécessite quelques calculs mathématiques [9]. Le principe de cet algorithme est relativement simple expliqué par les points suivant :

- La tension et le courant sont utilisés pour le calcul de la puissance.
- Faire une perturbation de la tension et observe le changement de la puissance.
- Le rapport cyclique du convertisseur est corrigé pour obtenir la puissance maximale.

Le tableau. 2.1 montre les principales démarches de l'algorithme P&O.

Tableau. 2.1 : Les principales démarches de l'algorithme P&O.

Direction du rapport cyclique	Puissance de la charge	Prochaine perturbation
Augmentation	Positive	Augmentation
Diminution	Négative	Augmentation
Augmentation	Négative	Diminution
Diminution	Positive	Diminution

2) MPPT à base de Echo State Network (ESN)

Les réseaux de neurones artificiels ont le potentiel de fournir une méthode améliorée de dériver des modèles non linéaires qui est complémentaire aux techniques conventionnelles. Les réseaux neuronaux ont des capacités d'auto-adaptation qui les rendent bien adaptés pour gérer les non-linéarités, les incertaines et les variations de paramètres qui peuvent survenir dans une installation contrôlée. Récemment, Echo State Network 'ESN' a attiré beaucoup d'attention en raison de sa haute précision et de ses performances d'apprentissage. Comparée à la structure aléatoire traditionnelle et aux unités sigmoïdes classiques, la topologie de cercle simple et les neurones intégrateurs qui fuient ont plus d'avantages sur le calcul de réservoir d'ESN. Autrement-dit : un ESN est un type de fonctionnement du réseau neuronal récurrent en temps discret. ESN (figure. 2.6) peut être divisé en trois parties [10]:

1. la couche d'entrée où les neurones reçoivent les informations provenant de l'environnement.
2. le réservoir, avec récurrence à l'intérieur, fournit une sorte de projection d'entrée dans un espace plus grand et un effet de mémoire. Cette projection d'entrée via le réservoir améliore la séparation linéaire de l'information. La conception du réservoir ESN consiste en la configuration de plusieurs paramètres [11]:

- Le nombre de neurones réservoirs est l'un des paramètres les plus importants.
 - La connectivité du réservoir: Pour obtenir les meilleurs résultats, les neurones réservoirs ne sont pas tous connectés.
 - Le rayon spectral: Mathématiquement, le rayon spectral d'une matrice carrée correspond à la valeur maximale de cette matrice.
 - Le taux de fuite: C'est une notion importante d'ESN et elle correspond à l'importance de la sortie du réservoir. Sa valeur doit être déterminée dans l'intervalle $[0; 1]$, et plus cette valeur est importante, moins l'écho du réservoir devient important.
3. La sortie avec possibilité d'analyse des informations en contact avec le réservoir permet de donner l'information optimale.

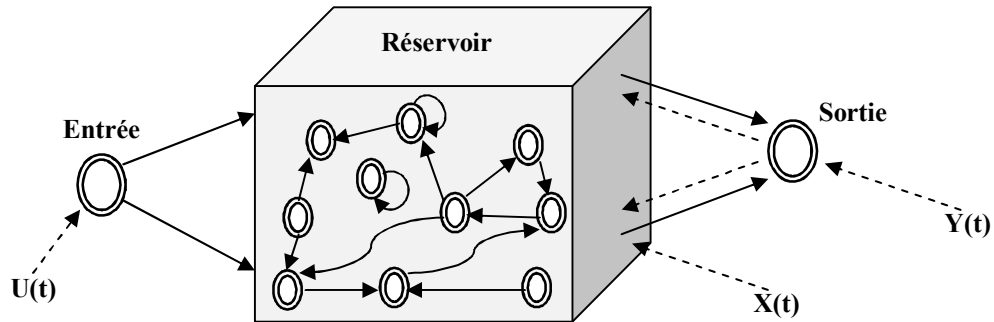


Figure. 2.6: Architecture d'un ESN.

L'algorithme d'apprentissage est divisé en deux étapes principales. Tout d'abord, l'ESN est simulé avec des données préalablement choisies pour l'étape d'apprentissage afin de trouver la matrice W_{out} fournissant la valeur MSE la plus faible. Dans un premier temps, la mise à jour du réservoir est calculée ou la sortie du réservoir $\tilde{X}(n)$ est donnée comme suit [12]:

$$\tilde{X}(n) = f(W_{inp}u(n) + W_{ires}u(n-1)) \quad 2.1$$

Avec: $u(n)$ est l'entrée ESN et $u(n-1)$ est la valeur du réservoir correspondant à l'échantillon précédent. Ce calcul de mise à jour du réservoir rend possible le calcul de la sortie ESN en utilisant α .

$$X(n) = f(1-\alpha).X(n-1) + \alpha\tilde{X}(n) \quad 2.2$$

La sortie de l'ESN est calculée avec le résultat précédent de l'équation (2.2):

$$Y(n) = W_{out}X(n) + W_{feed}Y(n-1) \quad 2.3$$

Cependant, la matrice de poids W_{feed} est optimale, ainsi le calcul de sortie ESN donné dans l'équation (2.3) peut être simplifié par l'équation (2.4):

$$Y(n) = f(W_{out} \cdot X(n)) \quad 2.4$$

Avec l'équation (2.1) et (2.3), il est possible d'obtenir la matrice de W_{out} grâce à une régression multilinéaire (2.5):

$$W = (A^T \cdot A - \lambda I) A^T \cdot B \quad 2.5$$

Dans ce cas, W , I et A représentent la sortie du réservoir et B le signal cible de la sortie.

Différents algorithmes MPPT ont été discutés dans la littérature [13]. Cependant, les majorités sont limitées face aux changements climatiques et changeants en effet d'ombrages. Dans ce qui suit nous avons utilisés le ESN est comme un algorithme de poursuite de MPP du système PV. Dans l'algorithme proposé, la température (T) et le rayonnement solaire (S-R) considérées comme entrées et le rapport cyclique (D) du convertisseur élévateur DC/DC fournit la sortie du système (figure. 2.7).

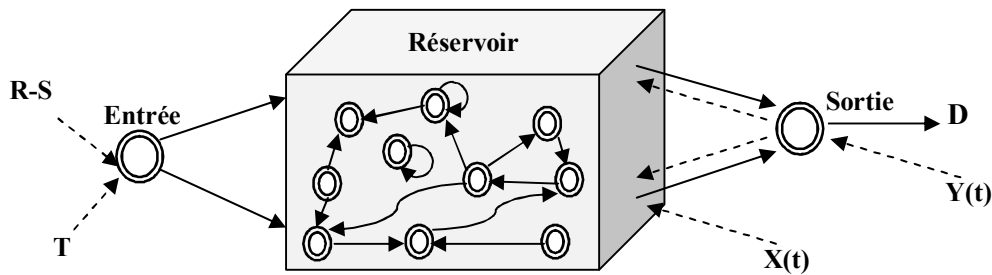


Figure. 2.7: Principe de l'MPPT basé sur l'ESN.

3) Algorithme GWO-MPPT

Les techniques d'optimisation méta-heuristiques sont devenues très populaires au cours des deux dernières décennies. Étonnamment, certains d'entre eux tels que l'algorithme génétique (GA) [14], l'optimisation par des colonies de fourmis (ACO) [15] et l'optimisation par des essaims de particules (PSO) [16] sont assez bien connus dans des différents champs d'application. En plus du grand nombre de travaux théoriques, de telles techniques d'optimisation ont été appliquées dans divers domaines d'étude. On se demande pourquoi les méta-heuristiques sont devenues remarquablement communes. La réponse à cette question peut être résumée en quatre raisons principales: simplicité, flexibilité, mécanisme sans dérivation et évitement d'optima local. L'algorithme GWO est proposé par Mirjalili et al. [17]. Il imite la hiérarchie de leadership et le mécanisme de chasse des loups gris dans la nature. La figure. 2.8 montre trois étapes principales de

l'algorithme GWO, à savoir la chasse, la poursuite et le suivi de proies, de proies encerclées et de proies attaquant qui sont mises en œuvre pour concevoir GWO pour effectuer une optimisation.

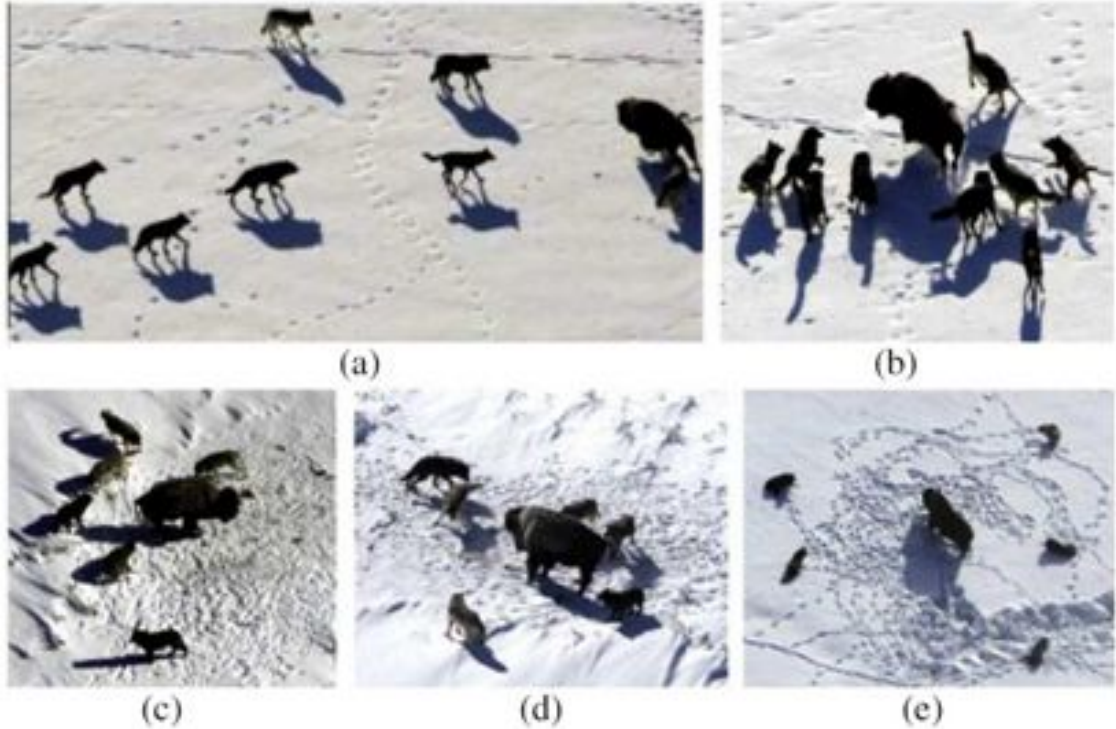


Figure. 2.8: Comportement de chasse des loups gris: (a) - (c) chasse et traque des proies; (d) des proies encerclées; et (e) attaquer une proie.

Les positions possibles mises à jour dans les espaces 2D et 3D sont illustrées par la figure. 2.9.

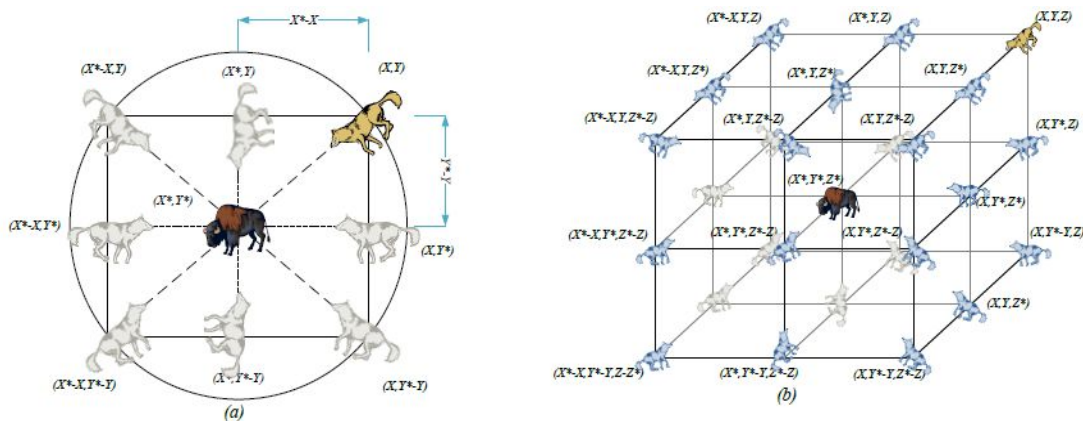


Figure. 2.9: Vecteurs de position 2D et 3D et leurs prochains emplacements possibles.

Les loups gris sont considérés comme étant en haut de la chaîne alimentaire et préfèrent vivre dans une meute. Quatre types de loups gris tels que : alpha (α), bêta (β), delta (δ) et omega (ω) sont utilisés pour simuler la hiérarchie de leadership (figure. 2.10).

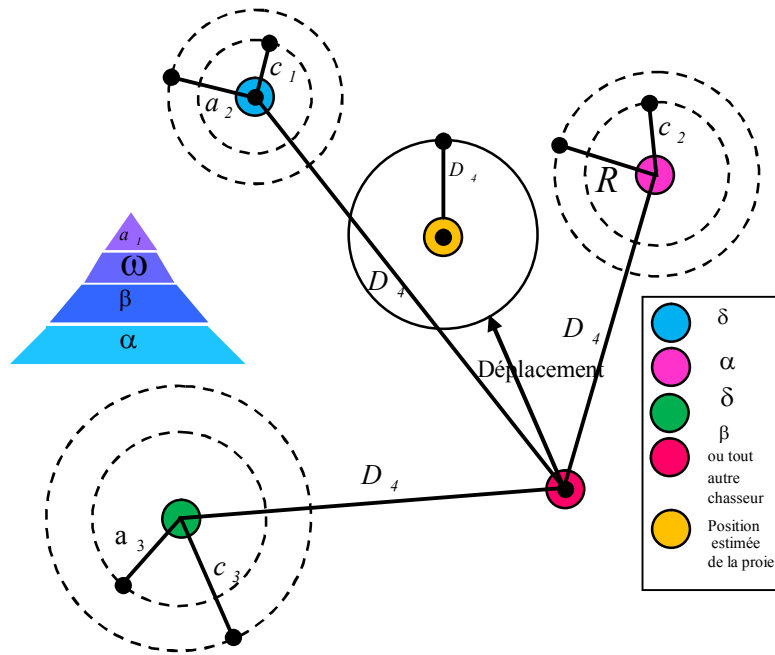


Figure. 2.10: Hiérarchie du loup gris (la dominance diminue de haut en bas) avec la position en cours de mise à jour pour le GWO.

Les loups gris entourent une proie pendant la chasse et l'encerclement du comportement peut être modélisé par les équations suivantes:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}_p(t) \right| \quad 2.6 (a)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad 2.6 (b)$$

Où : t désigne l'itération courante, D, A et C désignent des vecteurs de coefficients, X_p est le vecteur de position de la proie, et X indique le vecteur de position du loup gris. Les vecteurs A et C sont calculés comme suit:

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad 2.7 (a)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad 2.7 (b)$$

Où : les composantes de a diminuent linéairement de 2 à 0 au cours des itérations et r_1 , r_2 sont des vecteurs aléatoires dans [0, 1]. La chasse est généralement guidée par des leaders appelés alpha, suivis de bêta et de delta qui peuvent aussi participer à la chasse de temps en temps. Delta et Omega prennent soin des loups blessés dans la meute. Par conséquent, nous considérons l'alpha comme la solution candidate ayant une meilleure connaissance de l'emplacement des proies. Les loups gris finissent la chasse en attaquant la proie quand elle arrête de bouger.

Pour mettre en œuvre le MPPT basé sur GWO, le rapport cyclique D du convertisseur DC/DC est défini comme un loup gris. Par conséquent, (2.6) peut être modifié comme suit:

$$D_i(k+1) = D_i(k) - A.D \quad 2.8 (a)$$

Ainsi, la fonction de mise en forme de l'algorithme GWO est formulée comme suit:

$$P(d_i^k) > P(d_i^{k-1}) \quad 2.8 (b)$$

Où : P représente la puissance, D est le rapport cyclique, i le nombre de loups gris actuels et k le nombre d'itérations.

4) *MPPT à base de l'ESN-GWO*

Parmi les modèles possibles pour concevoir des contrôleurs dans le contrôle direct et indirect, les réseaux de neurones sont largement étudiés et présente des avantages en termes de modélisation des systèmes dynamiques avec sa mémoire dynamique et son intégration dans le temps. ESN comprend deux composants: un réseau récurrent fixe transportant des informations sur l'historique d'entrée, et une lecture anticipée adaptative qui récupère les informations désirées liées à l'entrée. ESN compense pour ne pas former les poids de connexion récurrents en augmentant la dimensionnalité de la couche cachée. Lors de la formation des ESN, nous avons seulement besoin d'optimiser les poids d'un feed-forward du réseau linéaire. ESN a été appliqué avec succès comme approche naturelle serait d'utiliser également en tant que contrôleur. Il a la puissance du réseau récurrent mais il nécessite une formation plus simple. Un problème se pose sur la façon de former la lecture dans un système de contrôle. Normalement, il serait formé par des algorithmes récursifs qui minimisent l'erreur quadratique moyenne (MSE) ou l'impulsion d'erreur d'ordre supérieur, ou simplement par la solution de Vlener-Hopf [18]. Cependant, dans de tels cas, nous avons toujours besoin d'un modèle de référence. La simplicité de sa formation semblerait insignifiante pour réduire la complexité de la conception d'un contrôleur. Dans ce que suit, nous étudions la faisabilité de combiner ESN et GWO dans le cadre d'assurer un contrôle adaptatif direct pour atteindre à la fois une performance robuste et une efficacité de calcul afin de présenter une MPPT de haute fiabilité. La structure du système de contrôle adaptatif direct à l'aide d'un ESN qui est utilisé pour construire la fonction :

$$u_K = U(e_K, d_{K+1}) \quad 2.9 (a)$$

De sorte que :

$$y_{K+1} = g(y_K, u_{K+1}) = d_{K+1} \quad 2.9 (b)$$

Où : g décrit la plante inconnue.

La lecture linéaire de l'ESN est optimisée par GWO avec une conception simple de la fonction Fitness. L'erreur de sortie de la plante inconnue doit être minimisée. L'erreur quadratique moyenne est un choix évident pour la fonction objectif. A chaque pas t, on calcule $1/N-(d_t-y_t)^2$ tout au long de la séquence d'entraînement. Ce critère garantira la convergence de l'erreur de sortie. Cependant, nous pouvons également avoir besoin de contraindre sur le signal de contrôle. Intuitivement, si les sorties du système sont lisses, nous voulons que le signal de contrôle soit également lisse. Un scénario qui peut souvent se produire est que le signal de contrôle peut osciller tout en produisant la sortie désirée. Pour résoudre ce problème, nous ajoutons la finesse du signal de contrôle dans la fonction fitness. Une méthode simple consiste à calculer le taux de variation moyen (qui peut être approché par la dérivée du premier ordre de la séquence de contrôle). Ainsi, nous définissons le fitness en forme GWO pour optimiser W_{out} suivant :

$$F(W_{out}) = \frac{1}{N} \left[\sum_{t=1}^N (d_t - y_t)^2 + \sum_{t=2}^N (u_t - u_{t-1})^2 \right] \quad 2.10$$

2.3.2. Simulations et analyses

Afin de tester les performances des différentes algorithmes : MPPT P&O, MPPT à base de ESN, MPPT à base de GWO et MPPT à base de ESN-GWO, un modèle composé d'un module PV de types Siemens SM110- 24 (ANNEX A), hacheur boost et une charge résistive est simulé pour les conceptions de température de 25⁰C et des variations brusques de l'irradiations solaire (voir figure. 2.11 a). La figure. 2.11 b montre la puissance produite avec les algorithmes proposés. Il est bien observé qu'avec l'utilisation du MPPT à base de l'ESN la puissance produite est plus rapide et plus stable que l'utilisation du P&O. Bien que l'utilisation du MPPT base de GWO donne de bonne réponse de la puissance mais moins stable que l'utilisation de l'MPPT ESN (voir figure. 2.11 d). La figure 2.11 d montre que l'optimisation de l'ESN en utilisant le GWO permettra d'améliorer la réponse de la puissance.

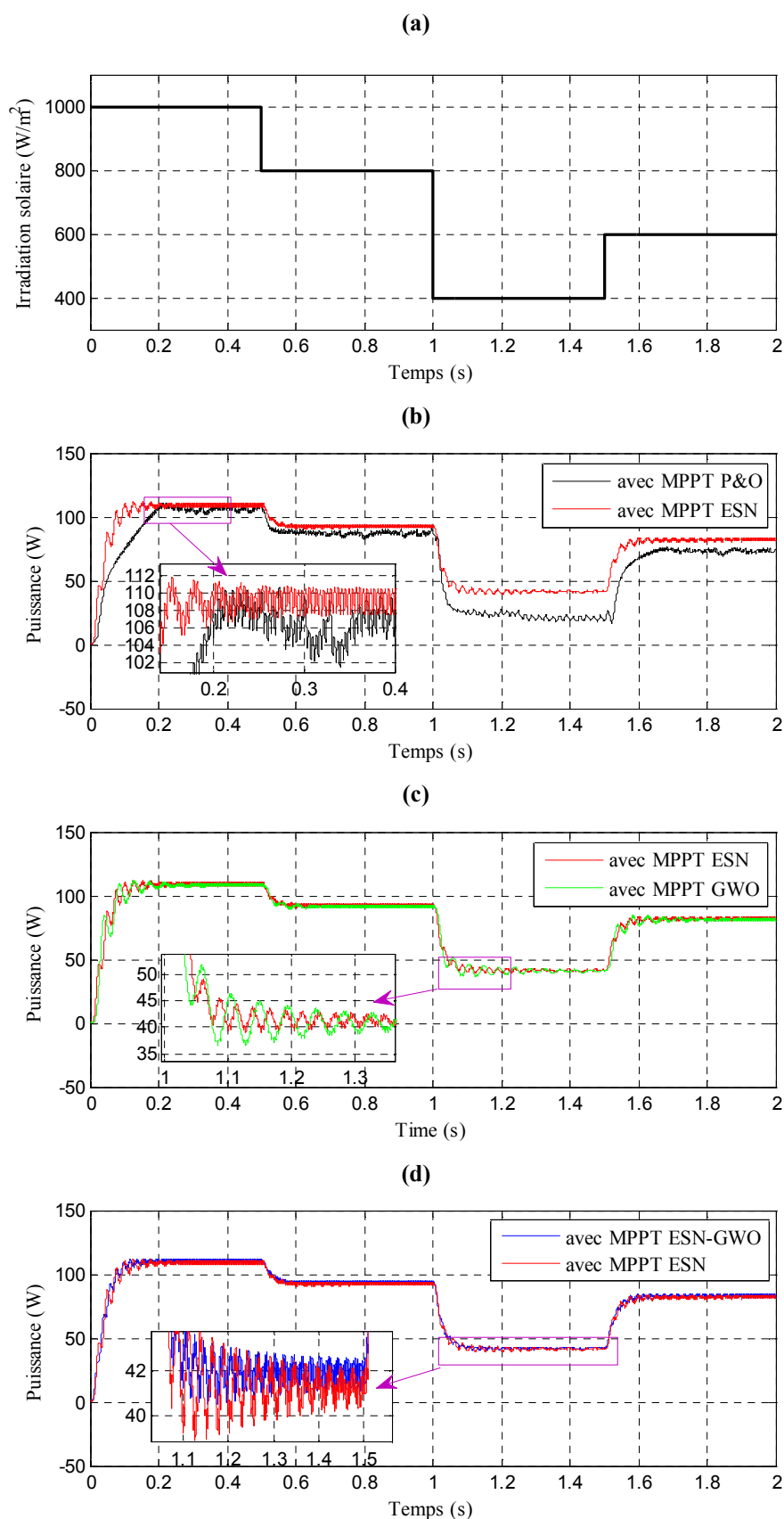


Figure. 2.11 : Réponse de la puissance avec utilisation MPPTs (P&O, ESN, GWO et ESN-GWO).

2.3.3. Étude de la commande en mode raccordement au réseau

Pour le raccordement des sources solaires photovoltaïques aux réseaux électriques il est nécessaire et important d'utiliser les convertisseurs de puissances. Généralement, la configuration onduleur de tension triphasée à deux niveaux, en anglais "Voltage Source Inverter (VSI)", est la topologie la plus utilisée dans de nombreuses applications en raison de sa simplicité, sa fiabilité et sa robustesse. Pendant plusieurs années, ils ont souvent été employés dans le secteur industriel [19,20]. Comme on le sait, les systèmes VSI connectés au réseau sont capables de contrôler le flux de puissance et offrant des niveaux élevés de rendement et de fiabilité. Généralement, les techniques de contrôle utilisées et classées comme stratégies de contrôle direct ou indirect (voir Figure. 2.12).

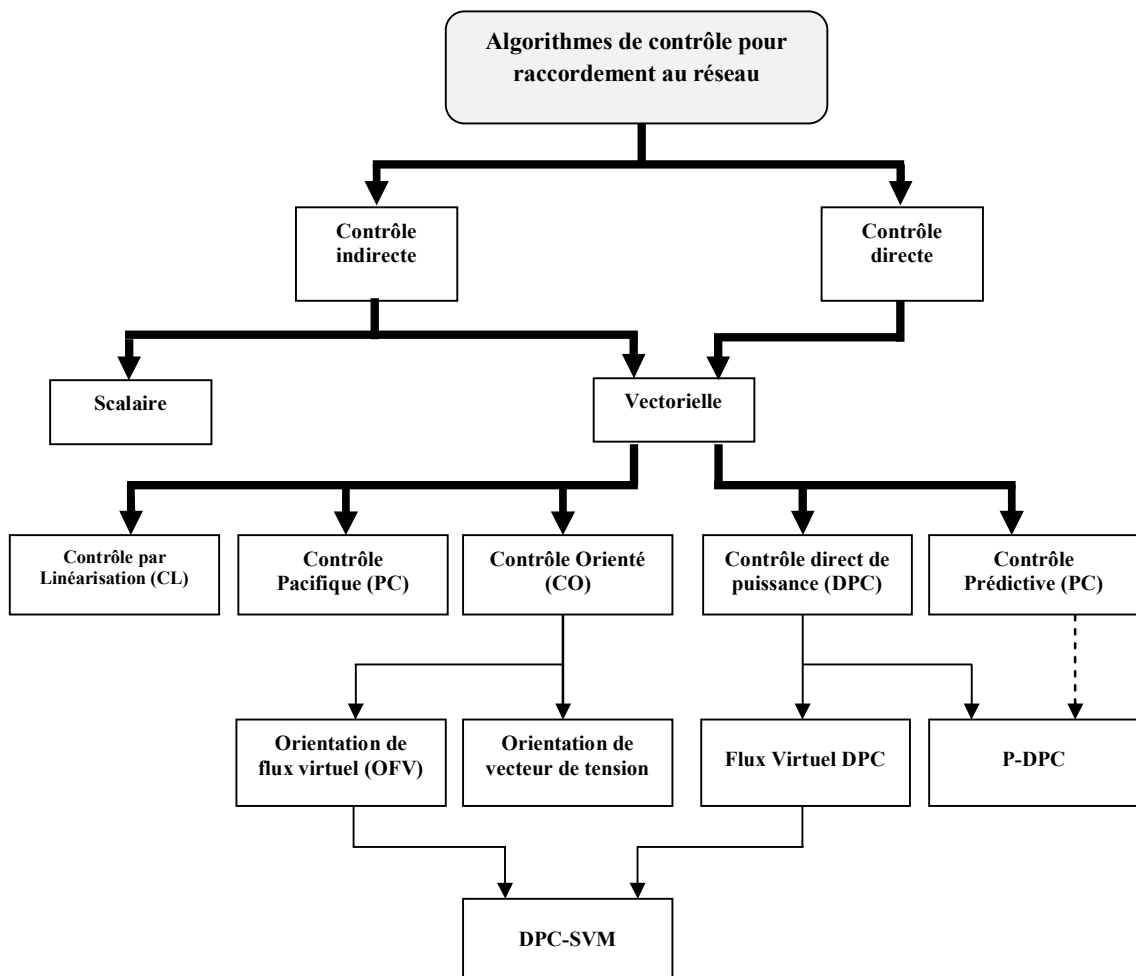


Figure. 2.12: Classification des techniques de contrôle utilisées pour les VSI connectés au réseau.

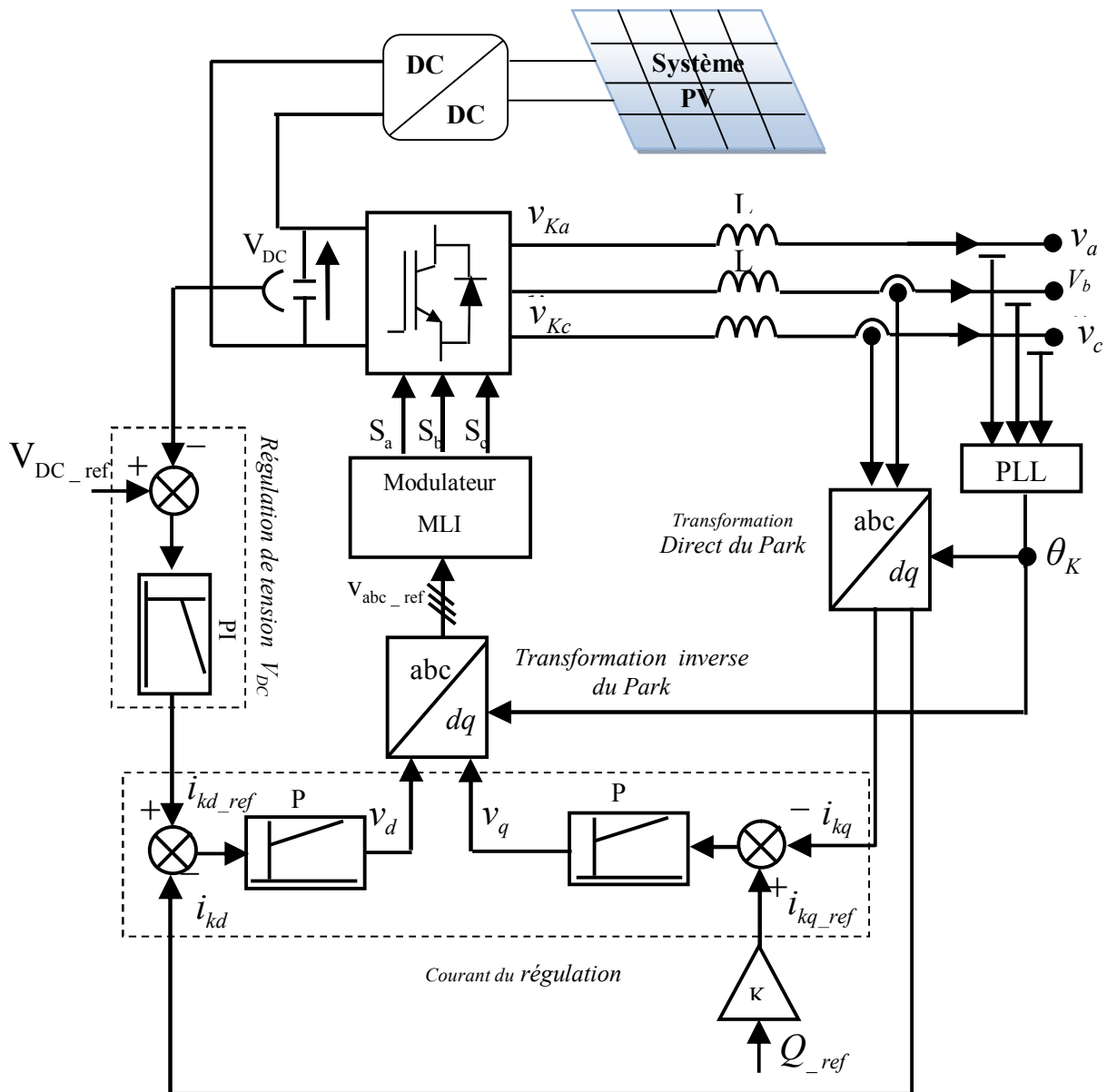


Figure. 2.14: Schéma de principe de l'IVOC dans la référence fixe ab .

Des développements récents ont popularisé le concept Virtual Flux (VF), qui suppose que le filtre de ligne du réseau et du convertisseur se comporte comme un moteur à courant alternatif. Ainsi, la résistance et l'inductance du filtre sont équivalentes à la résistance de phase et à l'inductance de fuite du moteur, alors que la tension de phase du convertisseur est liée à un flux virtuel fictif [22]. L'un des principaux avantages de cette approche est qu'elle est moins sensible aux variations de la tension de ligne que d'autres approches. Le contrôle orienté flux virtuel (VFOC) est une adaptation du ICOV à un cadre de référence VF [23], voir figure. 2.15.

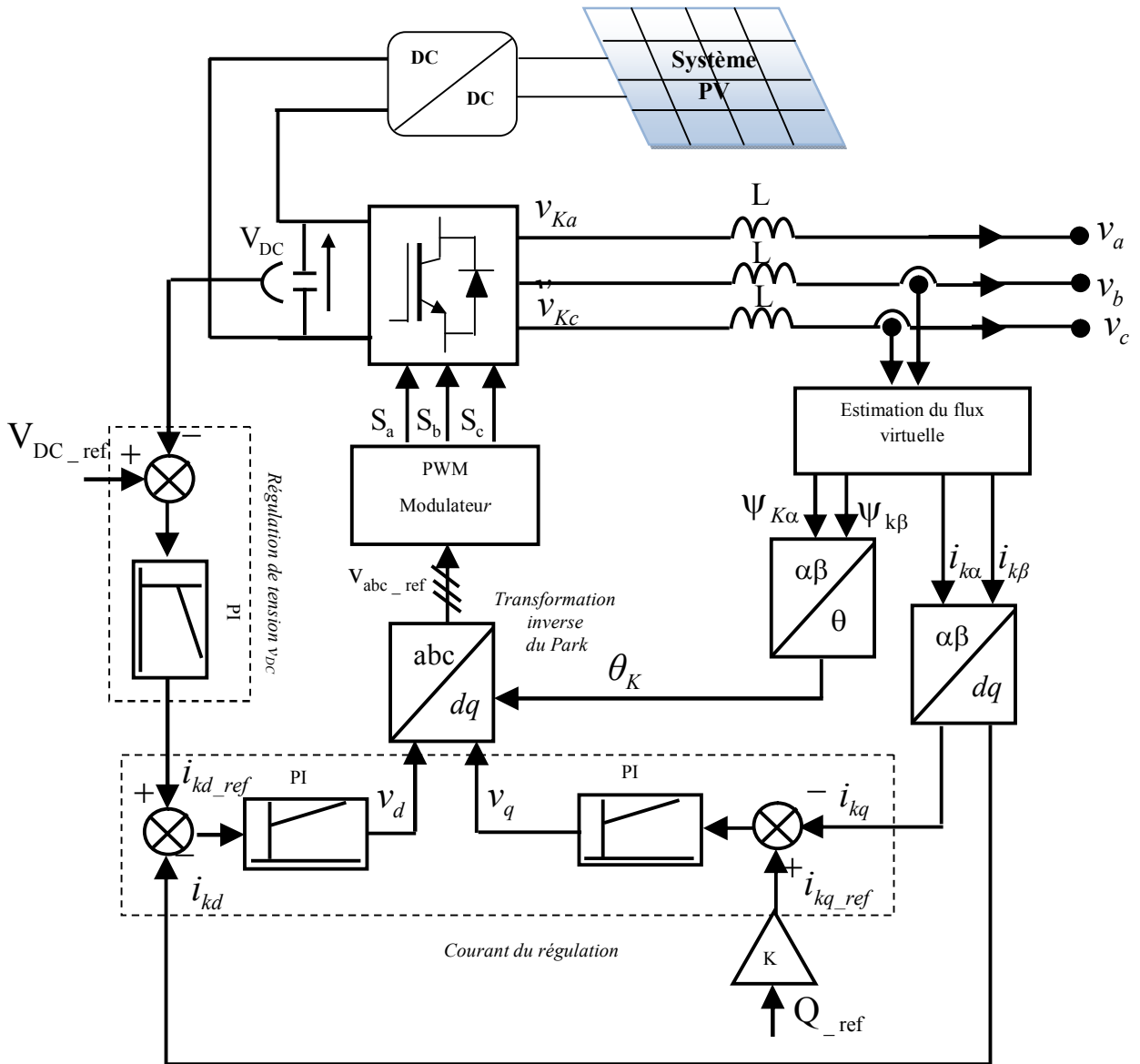


Figure. 2.15: Diagramme de VFOC.

Les stratégies de contrôle indirect conduisent généralement à un bon comportement transitoire et à un fonctionnement en régime permanent acceptable. Ils fonctionnent à une fréquence de commutation constante, ce qui rend possible l'utilisation de techniques de modulation avancées. Par conséquent, il devient plus facile d'optimiser les pertes de puissance de conversion ou de simplifier la conception du filtre côté ligne. Cependant, ces techniques de contrôle présentent certains inconvénients. Le problème principal est commun dans toute stratégie de contrôle indirect. Le VSI ne peut pas être considéré comme une source de tension continue contrôlée idéalement. Dans ces conditions, il devient impossible d'utiliser la notion de vecteur de tension moyen du convertisseur dans les exigences de contrôle.

B) Techniques de contrôle directes

Le contrôle direct de la puissance (DPC) est l'une des stratégies de contrôle direct les plus populaires des convertisseurs connectés au réseau [24]. Cette technique est dérivée du contrôle direct du couple (DTC) original des machines à courant alternatif. Dans chaque temps d'échantillonnage, il évalue lequel des vecteurs de tension instantanés convient le mieux pour pousser l'état du système vers la valeur de référence. Comme cette évaluation est effectuée en continu, la technique de contrôle direct ne nécessite aucun modulateur et est capable d'obtenir la capacité dynamique maximale disponible dans le système. De plus, il ne nécessite aucune boucle de contrôle interne ni aucune transformation de coordonnées, évitant les effets de couplage entre les variables transformées. Dans le cas du DPC, les boucles de régulation de puissance active et réactive instantanées sont basées sur des régulateurs d'hystérésis qui sélectionnent le vecteur de tension approprié à partir d'une table de commutation, voir figure. 2.16.

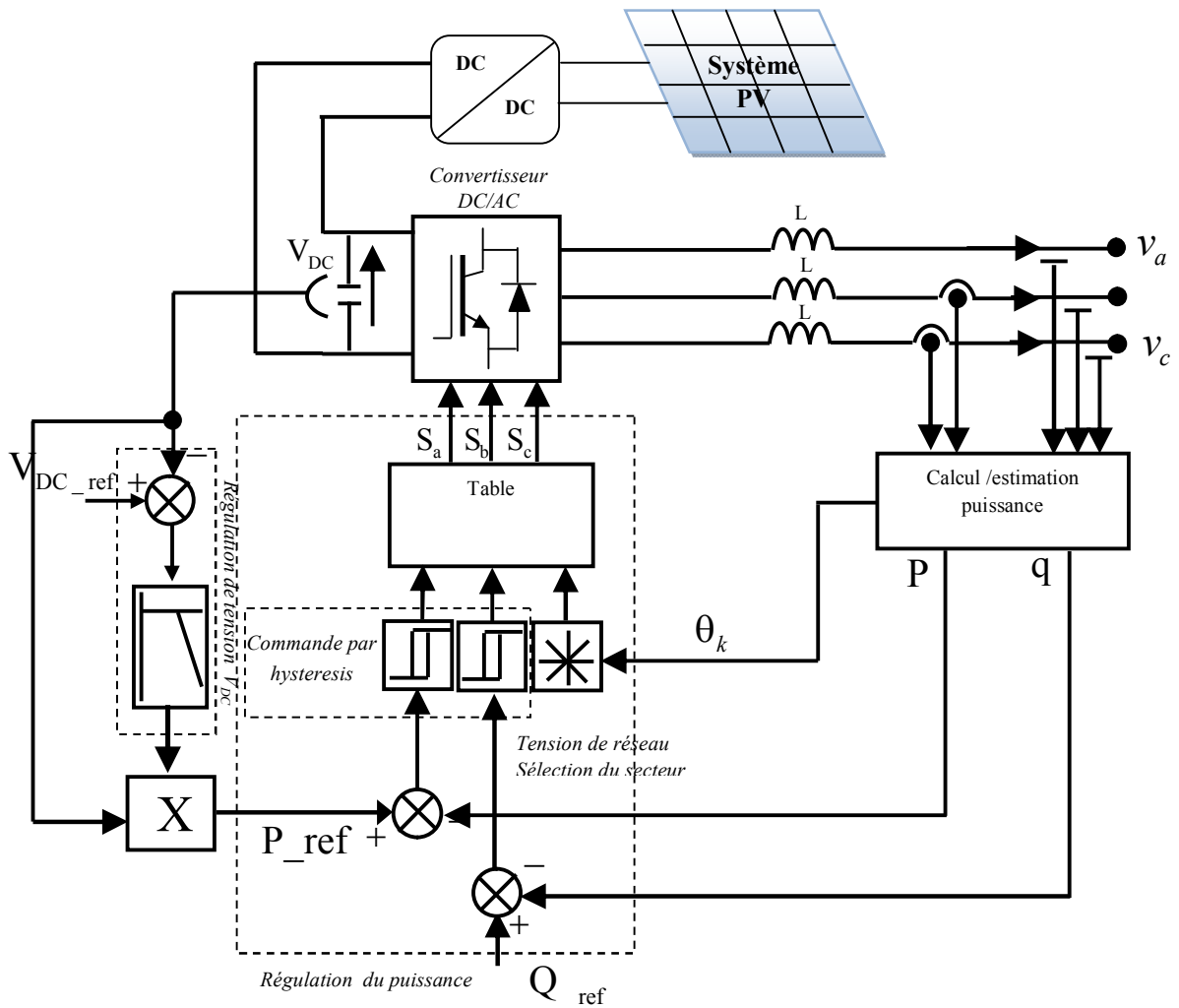


Figure. 2.16: Diagramme de DPC.

La technique DPC a été également implantée sous le concept VF, conduisant à Virtual Flux Direct Contrôle de puissance (VF-DPC) [23], voir figure. 2.17.

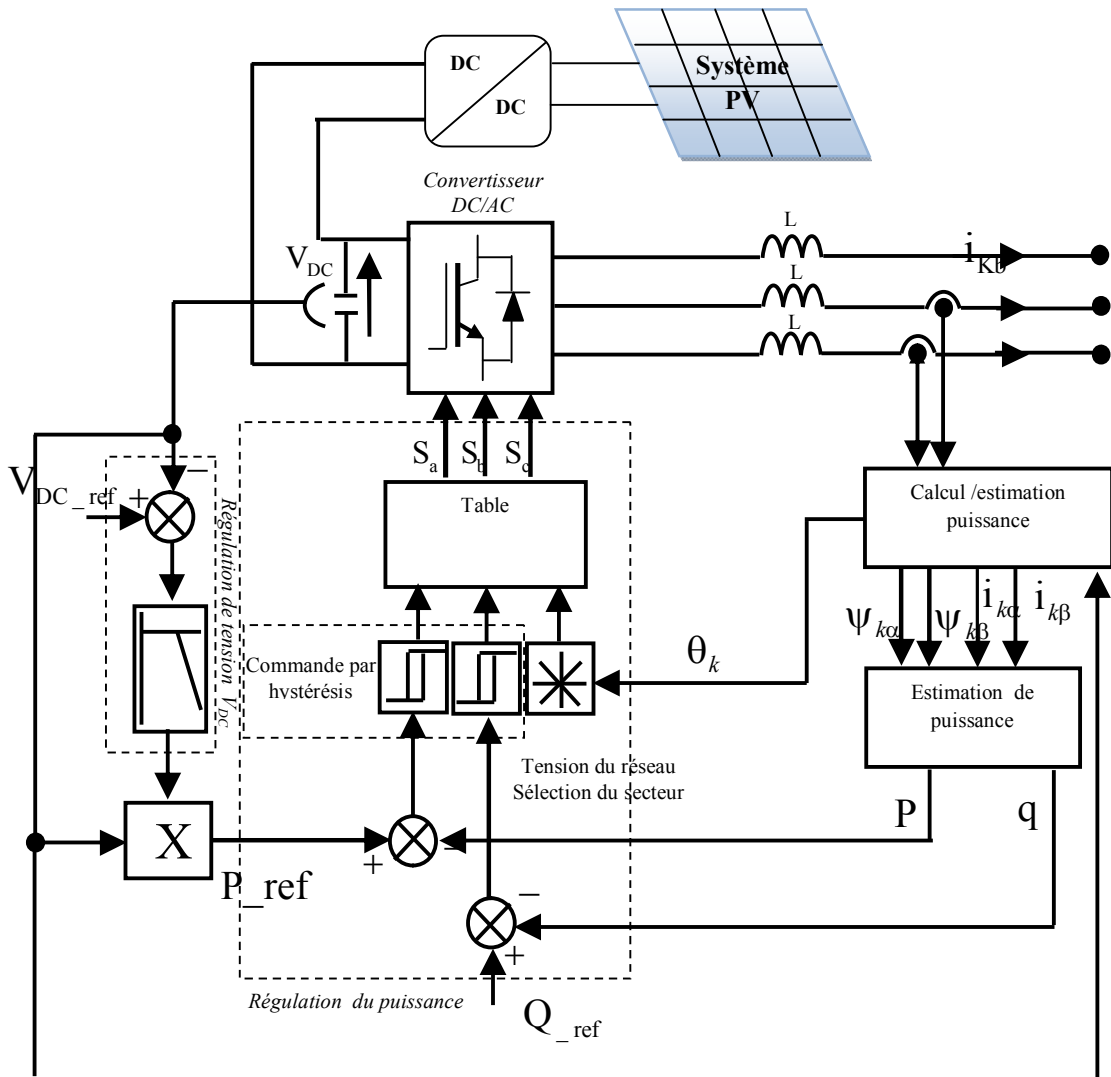


Figure. 2.17: Diagramme de VF-DPC.

L'inconvénient principal de la DPC est la fréquence de commutation variable qui n'est pas généralement limitée et dépend du temps d'échantillonnage, de la structure de la table de consultation, des paramètres de charge et de l'état du système. En conséquence, elle génère un spectre harmonique dispersé, ce qui rend difficile la conception du filtre de ligne afin d'éviter d'éventuelles résonances du réseau [25]. L'approche mixte DPC-SVM est une adaptation des techniques VFOC et VF-DPC qui fournissent les tensions moyennes du convertisseur, également appliquée à la modulation vectorielle de l'espace (SVM) [26]. Cette stratégie pourrait être définie comme une méthode de contrôle direct basée sur le fait que le vecteur de tension moyen

du convertisseur est directement calculé en utilisant les exigences de poursuite de puissance active et réactive, voir figure. 2.18.

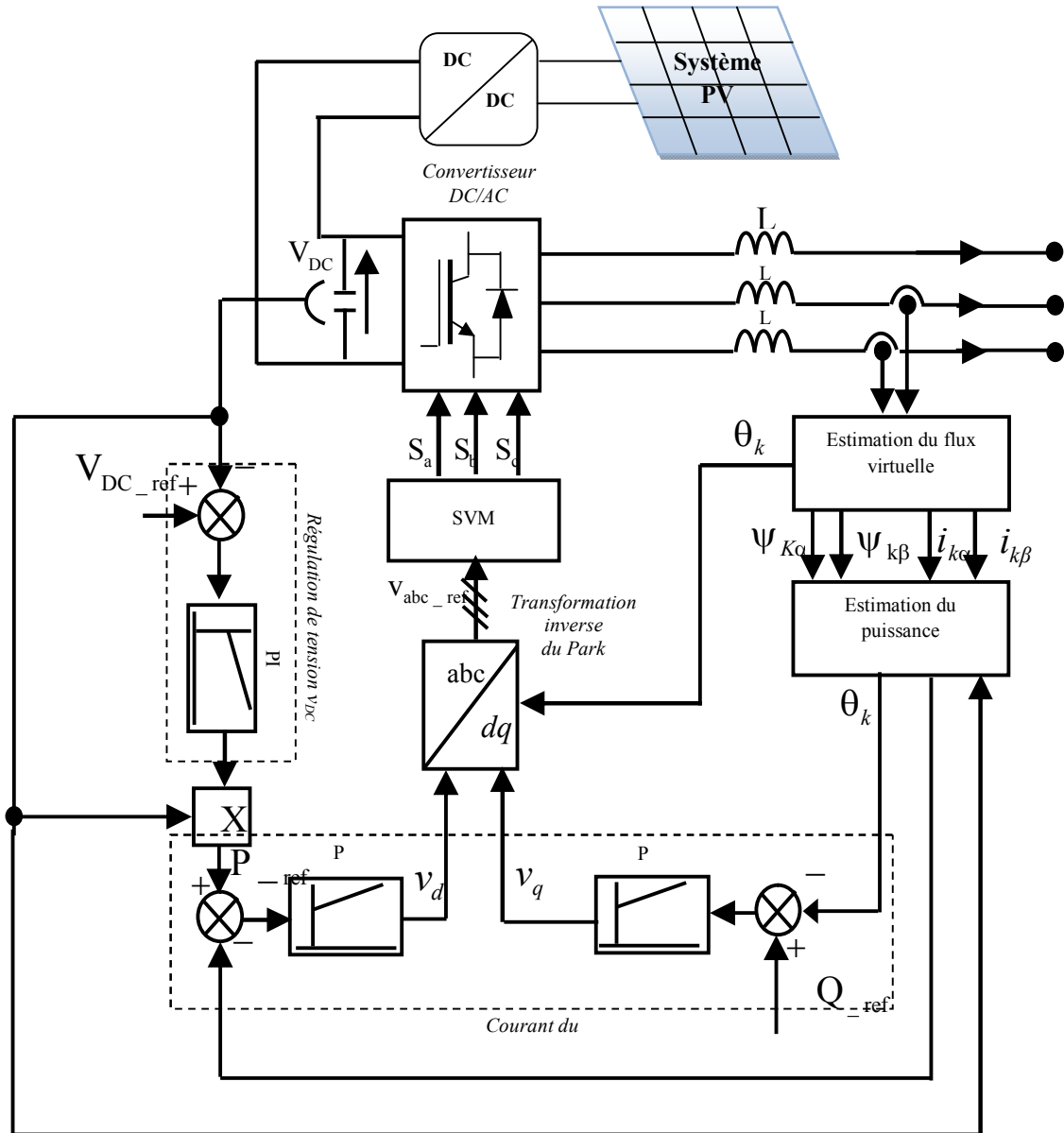


Figure. 2.18: Diagramme de DPC-SVM.

C) Techniques de contrôle avancé

Des approches prédictives ont été également utilisées pour surmonter le problème de fréquence de commutation variable de la stratégie DPC. Ces solutions ont été principalement utilisées dans le contrôle des machines à courant alternatif [27]. Au lieu de sélectionner un vecteur de tension optimal instantané (cas de DTC), les approches de type prédictif sélectionnent un ensemble optimal de vecteurs de tension concaténés, ce que l'on appelle la "séquence de vecteurs de tension". Le problème de contrôle est

résolu en calculant les temps d'application des vecteurs de la séquence de telle sorte que les variables contrôlées convergent vers les valeurs de référence le long d'une période de commutation prédéfinie fixe. De cette manière, un fonctionnement à fréquence de commutation constante est obtenu. Plusieurs auteurs ont développé ce concept dans des topologies de convertisseur multi-niveaux liées à différents types de machines mais il existe peu d'applications de contrôle prédictif sur les systèmes VSI connectés en ligne. Certains auteurs proposent des algorithmes de contrôle du courant prédictif liés aux exigences de contrôle de puissance, mais il en résulte une fréquence de commutation variable [28]. Des travaux intéressants ont été réalisés en ce qui concerne le contrôle de courant de ligne où une approche de type contrôle- glissant est combinée avec le calcul prédictif des temps d'application de la tension [29]. De cette manière, une dynamique transitoire élevée et une fréquence de commutation constante sont obtenues. Les techniques d'intelligence artificielle aussi sont proposées comme concurrents pour améliorer les performances de l'utilisation du VSI pour le raccordement au réseau.

2.4. Étude d'une chaîne de production éolienne

L'énergie éolienne est l'une des sources d'origine renouvelable les plus prometteuses en raison de l'épuisement probable et des progrès réalisés au cours des dernières décennies, des coûts élevés et des impacts environnementaux négatifs des sources d'énergie conventionnelles [30]. Les parcs éoliens peuvent être composés de générateurs à vitesse fixe ou variable, ainsi que par induction ou machines synchrones (aimants permanents et rotor bobiné) [31].

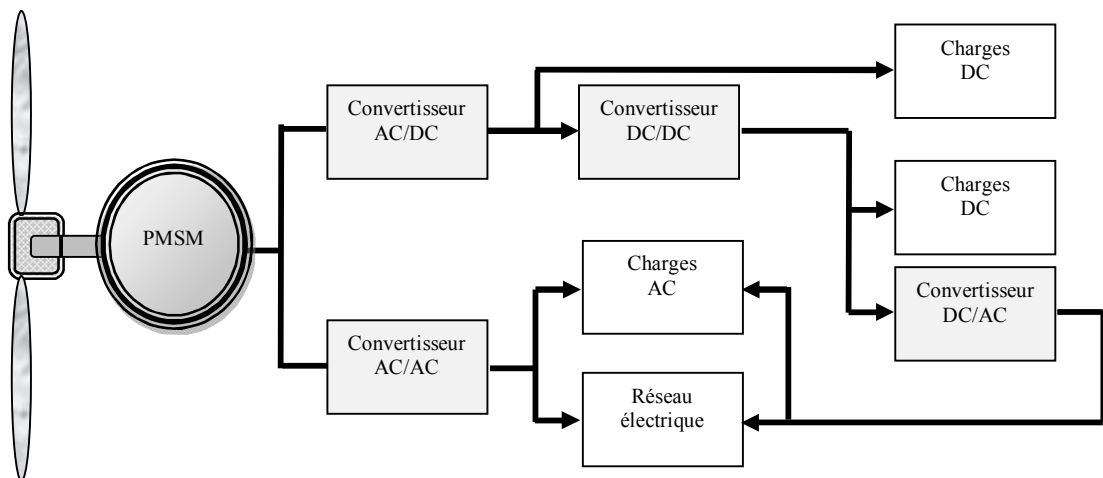


Figure. 2.19 : Différentes topologies d'une chaîne de production éolienne.

2.4.1. Étude de la commande en mode autonome

Les éoliennes sont commandées pour fonctionner uniquement dans une plage de vitesses de vent spécifiée délimitées par découplage de vitesses et de coupe. Au-delà de ces limites, la turbine doit être arrêtée pour protéger à la fois le générateur et la turbine. La figure. 2.20 montre la courbe typique de la puissance d'une éolienne [32]. À partir de la figure, on peut observer qu'il existe trois différentes régions opérationnelles. La première est la région à basse vitesse, où la turbine doit être arrêtée et déconnectée du réseau pour éviter qu'elle ne soit entraînée par le générateur [33]. La deuxième est la région à vitesse modérée qui est délimitée par la vitesse de démarrage à laquelle la turbine commence à fonctionner. Dans la région à grande vitesse, la puissance de la turbine est limitée de sorte que la turbine et le générateur ne sont pas surchargés [34].

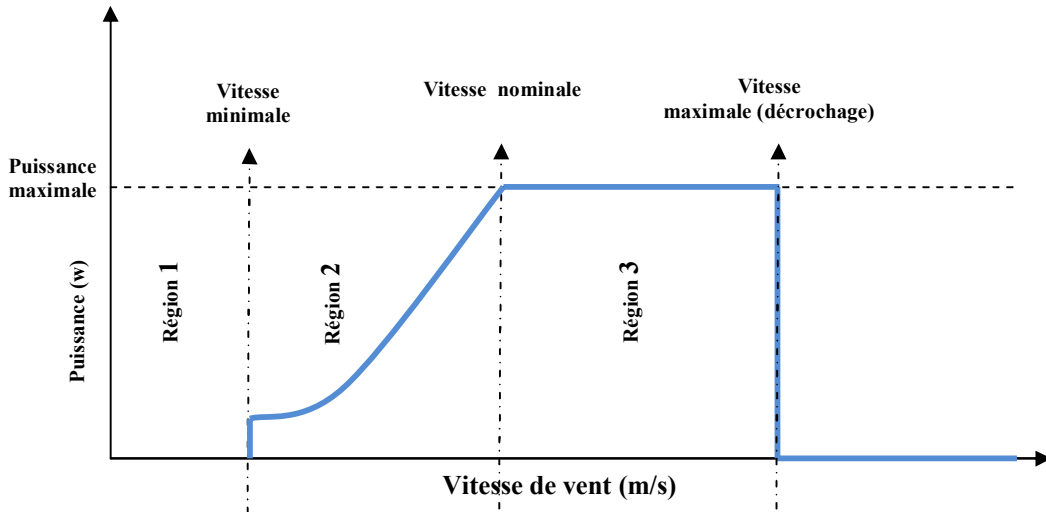


Figure. 2.20 : Courbe de puissance idéale d'une éolienne.

La figure. 2.21 illustre un système autonome d'éolienne fournit la puissance à une charge résistive et se compose d'éolienne, une machine PMSM, un redresseur AC/DC et d'un hacheur élévateur.

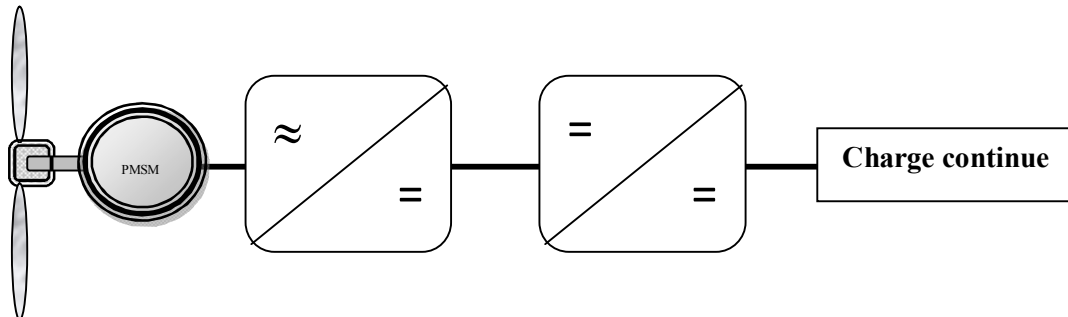


Figure. 2.21: Un schéma synoptique du système d'énergie éolienne utilisant le PMSM.

L'éolienne convertit l'énergie du vent en énergie mécanique, qui fait alors fonctionner un générateur pour créer de l'énergie électrique. La puissance mécanique générée par une éolienne peut être exprimée par [35]:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad 2.11$$

Le coefficient de puissance de la turbine (C_p) décrit l'efficacité d'extraction de la puissance de l'éolienne [36]. C'est une fonction non linéaire à la fois du rapport de vitesse de pointe (λ) et de l'angle mécanique de la lame (β). Alors que sa valeur théorique maximale est d'environ 0.59, en pratique elle se situe entre 0,4 et 0,45 [36]. Le rapport de vitesse d'embout est une variable exprimant le rapport de la vitesse linéaire des pointes d'aubes à la vitesse de rotation de l'éolienne [37], et peut être exprimé par:

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V_w} \quad 2.12$$

De nombreuses des équations ajustées pour C_p ont été utilisées dans des études antérieures. Ce document a défini C_p en fonction comme suit [38]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(116 \frac{1}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-(21/\lambda_i)} \quad 2.13$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad 2.14$$

Dans ce travail, en raison de l'hypothèse d'un rotor à pas fixe, l'angle (β) est mis à zéro. Par conséquent, les caractéristiques de C_p dépendent principalement de λ .

La figure. 2.22 présente C_p en fonction de λ . Selon la figure, il n'y a qu'un seul point optimal, noté λ_{opt} , où C_p est maximum. Le fonctionnement continu de l'éolienne à ce stade garantit qu'elle obtiendra la puissance maximale disponible du vent à n'importe quelle vitesse, comme le montre la figure. 2.23.

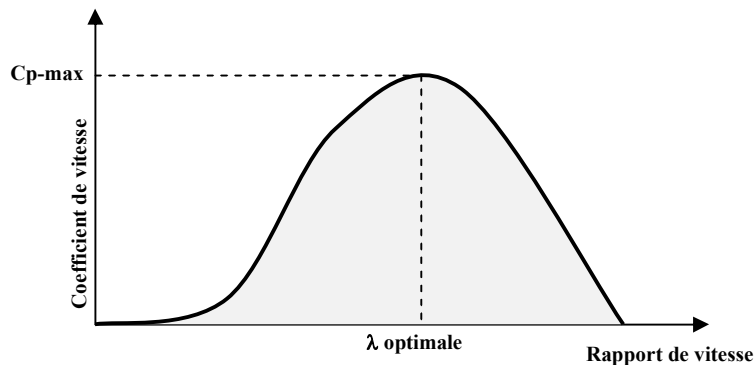


Figure. 2.22: La caractéristique du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse.

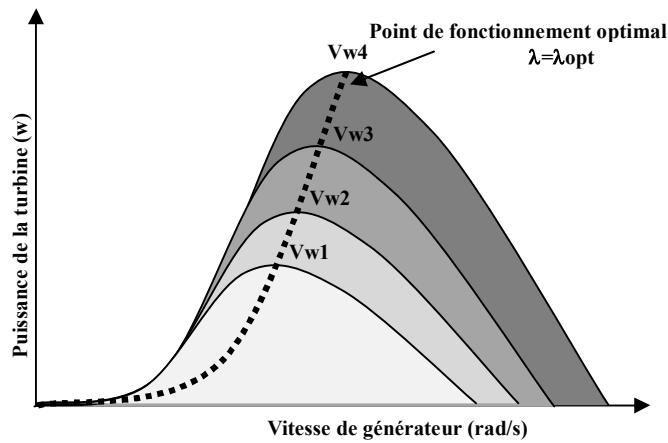


Figure. 2.23 : Caractéristiques de la puissance de la turbine en fonction de la vitesse de la rotation pour une série de vitesses du vent.

A. Contrôle du rapport de vitesse (TSR)

Le TSR optimal pour une éolienne est constant donnée indépendamment de la vitesse du vent. Si le TSR reste constamment à la valeur optimale, il est garanti que l'énergie extraite sera maximisée. Donc, cette méthode cherche à forcer le système de conversion d'énergie à rester à ce stade en le comparant avec la valeur réelle et l'alimentation. Cela, change la vitesse du générateur. Le point optimal de la TSR peut être déterminé expérimentalement ou théoriquement et stocké comme référence. Bien que cette méthode semble simple car la vitesse du vent est directement et continuellement mesurée, une mesure précise de la vitesse du vent est impossible en réalité et augmente le coût du système [39]. Le schéma de principe du procédé de contrôle du rapport de vitesse de pointe est représenté par la figure. 2.24.

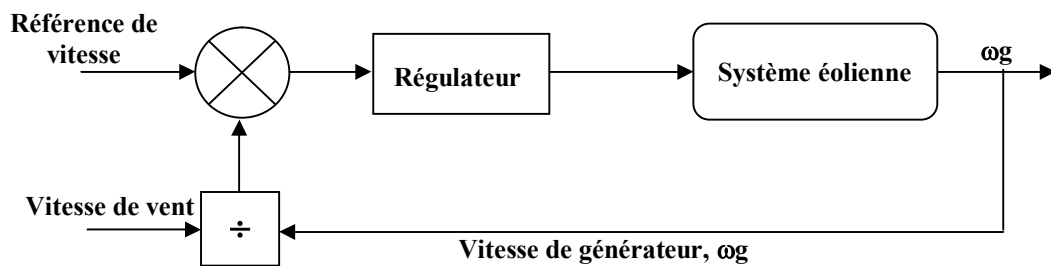


Figure. 2.24 : Le schéma de principe du contrôle du rapport de vitesse [39].

B. Contrôle optimal du couple (OTC)

Comme mentionné précédemment, le maintien du fonctionnement du système à λ_{opt} assure la conversion de l'énergie éolienne disponible en une forme mécanique. On peut observer à partir du schéma de principe, représenté par la figure. 2.25, que le principe de cette méthode est d'ajuster le couple PMSM en fonction d'un couple de référence de puissance maximale de l'éolienne à une vitesse de vent donnée.

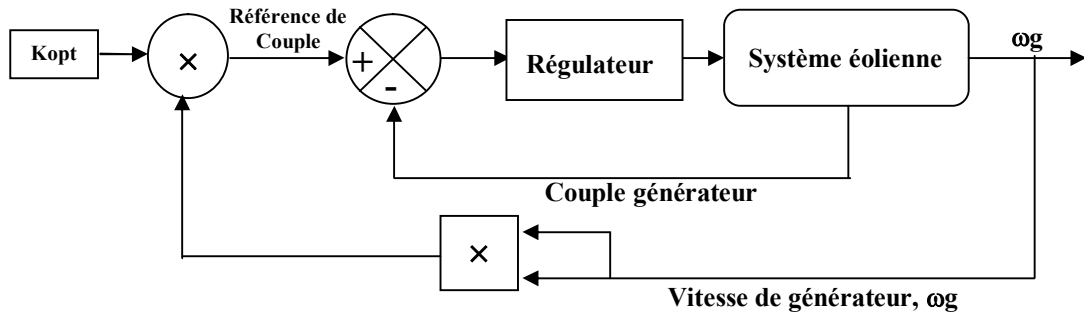


Figure. 2.25 : Le schéma de principe du contrôle optimal du couple.

Pour déterminer la puissance de la turbine en fonction de λ et ω_m , l'équation 2.12 est réécrit sous la forme suivante afin d'obtenir la vitesse du vent [40]:

$$V_w = \frac{\omega_m R}{\lambda} \quad 2.15$$

En remplaçant l'équation (2.15) dans l'équation (2.11), l'expression donne:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_m^3}{\lambda^3} C_p \quad 2.16$$

Si le rotor fonctionne à λ_{opt} , il fonctionnera également à $C_p \text{ max}$. Ainsi, en remplaçant $\lambda = \lambda_{opt}$ et $C_p = C_{p\text{-max}}$ dans l'équation 2.16, l'expression est obtenue comme suit:

$$P_{m\text{-opt}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_m^3}{\lambda_{opt}^3} C_{p\text{-max}} = K_{p\text{-opt}} \cdot \omega_m^3 \quad 2.16$$

Considérant que $P_m = \omega_m \cdot T_m$, T_m peut être réarrangé comme suit:

$$T_{m\text{-opt}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_m^2}{\lambda_{opt}^3} C_{p\text{-max}} = K_{opt} \cdot \omega_m^2 \quad 2.17$$

C'est une méthode basée sur le contrôle du couple, où l'expression analytique de la courbe de couple optimale, représentée par l'équation 2.17 est donné en tant que couple de référence pour le contrôleur qui est connecté à l'éolienne.

En général, cette méthode est simple, rapide et efficace. Cependant, l'efficacité est inférieure à celle de la méthode de contrôle du TSR, car il ne mesure pas la vitesse du vent directement, ce qui signifie que les changements de vent ne sont pas reflétés instantanément et de manière significative sur le signal de référence [41].

C. Commande de retour du signal de puissance (PSF)

Le schéma de principe d'un système d'énergie éolienne avec contrôle du signal de puissance (PSF) est représenté par la figure. 2.26. Contrairement à la commande OTC, la courbe de la puissance optimale de référence de l'éolienne doit être obtenue expérimentalement. Ensuite, les points de données pour la puissance de sortie maximale et la vitesse de l'éolienne correspondante doivent être enregistrés dans une table de correspondance [39].

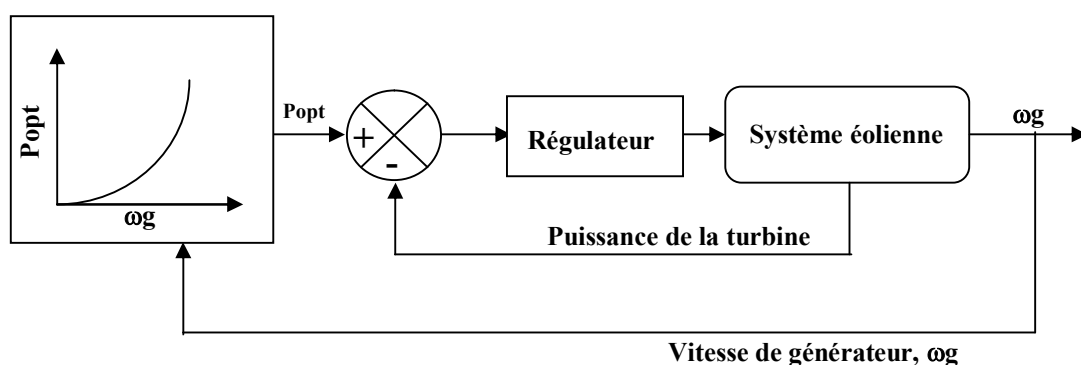


Figure. 2.26 : Le schéma de principe de la commande de retour du signal de puissance.

D. La méthode de commande : perturbations et observation (P&O)

La méthode de recherche perturbation et observation (P&O), ou «hill-climb search» (HCS), est une technique d'optimisation mathématique utilisée pour rechercher le point optimal local d'une fonction donnée. Il est largement utilisé dans les systèmes d'énergie éolienne pour déterminer le point de fonctionnement optimal qui maximise l'énergie extraite. Cette méthode est basée sur la perturbation d'une variable de contrôle de petite taille et l'observation des changements qui en résultent dans la fonction cible jusqu'à ce que la pente devienne nulle. Comme le montre la figure. 2.27, si le point de fonctionnement est à gauche du point de pic, le contrôleur doit le déplacer vers la droite pour se rapprocher du MPP, et vice versa s'il est de l'autre côté.

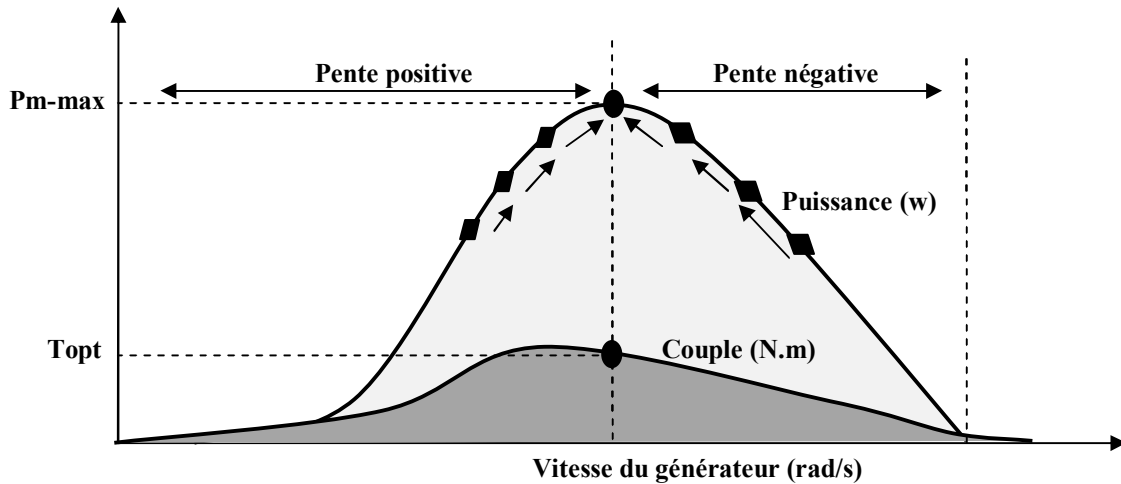


Figure. 2.27 : Puissance de la turbine et caractéristiques de couple avec processus de suivi MPP.

Dans la littérature, certains auteurs ont perturbé la vitesse de rotation et observé la puissance mécanique, tandis que d'autres surveillaient la puissance de sortie du générateur et perturbaient la tension d'entrée du variateur [37] ou le courant de la sortie, [38]. En mesure de puissance électrique, les capteurs mécaniques ne sont pas nécessaires, et donc ils sont plus fiables et à moindre coût. Comme la méthode P&O n'exige pas une connaissance préalable de la courbe caractéristique de l'éolienne, elle est indépendante, simple et flexible. Cependant, il n'atteint pas les MPP sous des variations rapides du vent s'il est utilisé pour des éoliennes de grande et moyenne inertie. Comme le montre la figure. 2.28 l'initialisation des paramètres affecte significativement les performances du système [39]. La méthode HCS est également influencée par la valeur de la capacité du condensateur de sortie du convertisseur, où une capacité plus importante réduit la vitesse de réponse du système [40].

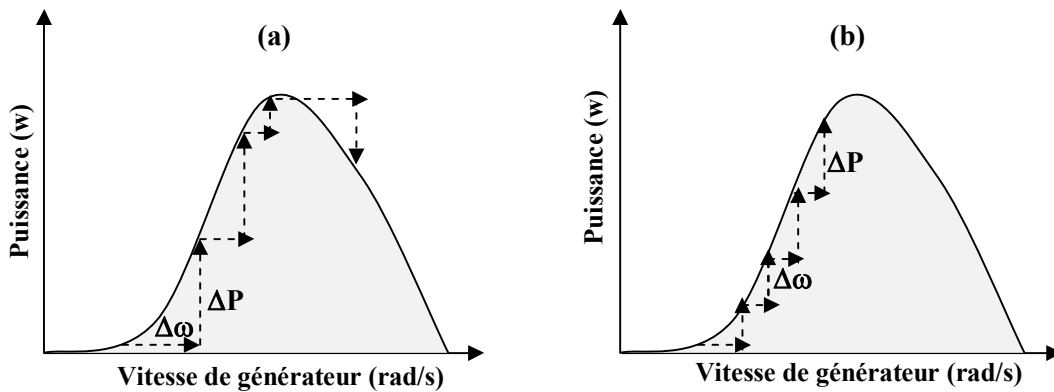


Figure. 2.28 : HCS contrôle (a) une grande perturbation et (b) une petite perturbation.

Beaucoup de problèmes associés aux méthodes de contrôles de systèmes éoliens ont été résolus par des méthodes hybrides et le contrôle de l'intelligence artificielle. Selon une étude [41], la méthode de contrôle par logique floue présente les avantages de la convergence rapide, de l'insensibilité des paramètres et de l'acceptation de signaux bruyants et imprécis. Cette méthode peut être utilisée pour obtenir une taille de pas optimale pour la méthode HCS conventionnelle [42]. La mesure de la vitesse du vent et ses inconvénients ont été résolus en utilisant des techniques de réseau de neurones pour estimer la vitesse du vent en fonction du couple et de la vitesse réels de la machine [43]. La structure de contrôle du réseau de fonction de base radiale de Wilcoxon (WRBFN) basé sur la stratégie HCS et l'algorithme d'optimisation par l'essaim de particules modifié (MPSO) présenté dans [44], diminue l'effet de l'inertie de l'éolienne sur la performance de la méthode HCS.

E. Optimisation de la commande PSF en utilisant l'algorithme Coucous Search (CS)

Dans la recherche opérationnelle, la technique de recherche de coucou est un algorithme d'optimisation développé par Xin-she Yang et Suash Deb en 2009 [45]. Il a été inspiré par le parasitisme obligatoire des couvées de certaines espèces de coucous en pondant leurs œufs dans les nids d'autres oiseaux hôtes (d'autres espèces). Certains oiseaux hôtes peuvent entrer en conflit direct avec les coucous intrus. Par exemple, si un oiseau hôte découvre que les œufs ne sont pas les leurs, il rejettera ces œufs extraterrestres ou abandonnera simplement son nid pour construire un nouveau nid ailleurs. Certaines espèces de coucous comme le tapera ont évolué de telle sorte que les coucous parasitoïdes femelles sont souvent très spécialisés dans le mimétisme des couleurs et des motifs des œufs de quelques espèces hôtes choisies comportement, et peut être donc appliqué pour divers problèmes d'optimisation [46]. La recherche Coucou (CS) utilise les représentations suivantes: Chaque œuf dans un nid représente une solution, et un œuf de coucou représente une nouvelle solution. L'objectif est d'utiliser les solutions nouvelles et potentiellement meilleures (coucous) pour remplacer une solution moins bonne dans les nids. Dans la forme la plus simple, chaque nid a un œuf. L'algorithme peut être étendu à des cas plus complexes dans lesquels chaque nid a plusieurs œufs représentant un ensemble de solutions. L'évolution des coucous représentés par la figure. 2.29.

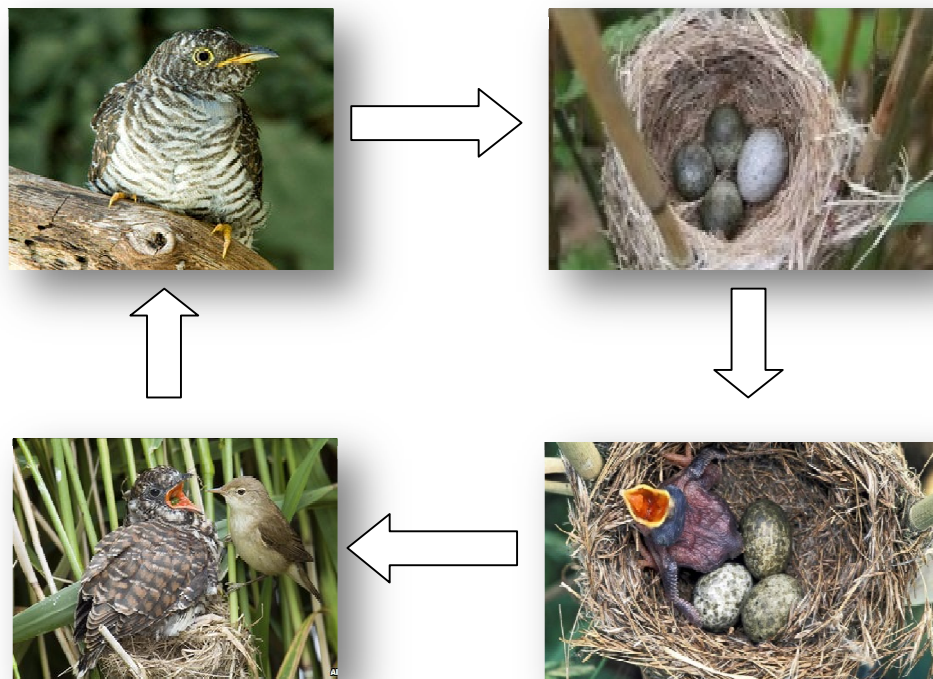


Figure. 2.29 : L'évolution coucou.

Le CS basé sur trois règles idéalisées:

1. Chaque coucou pond un œuf à la fois et dépose son œuf dans un nid choisi au hasard;
2. Les meilleurs nids avec des œufs de haute qualité se transmettront à la génération suivante;
3. Le nombre de nids hôtes disponibles est fixé, et l'œuf posé par un coucou est découvert par l'oiseau hôte avec une probabilité.

La découverte de fonctionner sur un ensemble de pires nids, et à découvert des solutions jetées à partir de calculs plus éloignés.

Une optimisation de la commande PSF en utilisant l'algorithme CS est effectuée pour but de maximiser la puissance générée par le système éolienne. Dont l'optimisation qui est en line, les gains du régulateur PI sont optimisés et une faible perturbation est ajoutée à la puissance optimale pour rendre l'algorithme CS plus flexible et l'aider à l'évolution rapide. La figure. 2.30 montre le système de l'optimisation par l'algorithme CS du PSF.

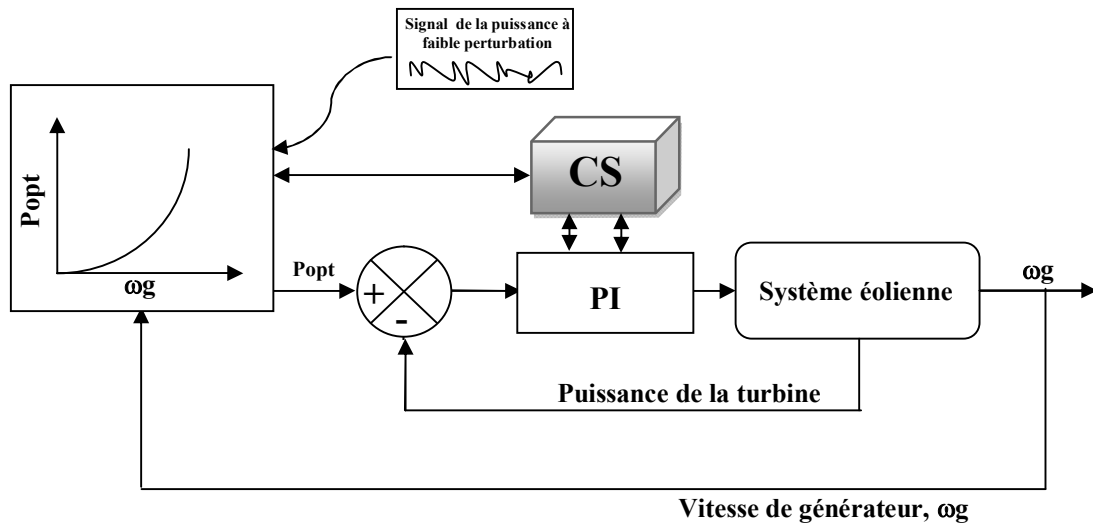
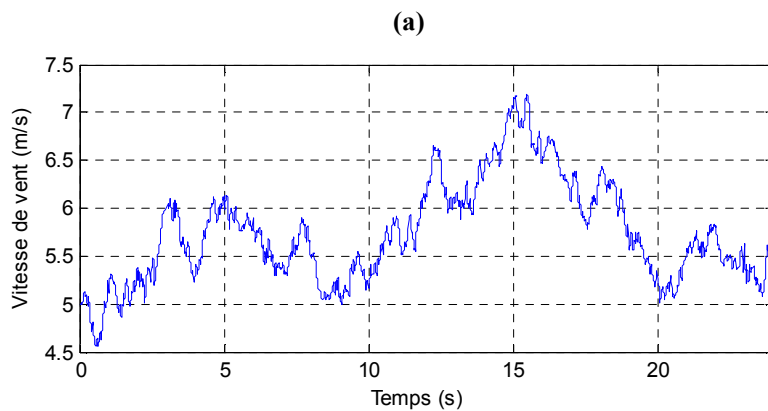


Figure. 2.30 : Optimisation de la commande PSF par CS.

Une simulation d'un système de production éolienne, composé d'une turbine, générateur synchrone et un Buck to Buck (AC/DC/AC) convertisseur qui alimente un moteur asynchrone a vitesse variable considéré comme charge, est effectuée sous les conditions d'un vitesse variable du vent, voir figure. 2.31 a.

Les résultats obtenus (figure. 2.31 b-c-d-e) montrent respectivement la vitesse de rotation de la MAS, le couple moteur pour la turbine, la puissance générée par l'éolienne avec les deux algorithmes PSF et PSF-CS et, le gain en puissance lors qu'on utilise de maximisation de la puissance par l'algorithme PFS-CS. Globalement il est noté que le MPPT PSF-CS est plus flexible et fiable en raison qu'il y a des surplus de puissance pour les mêmes condictions par apport au l'utilisation du PSF.



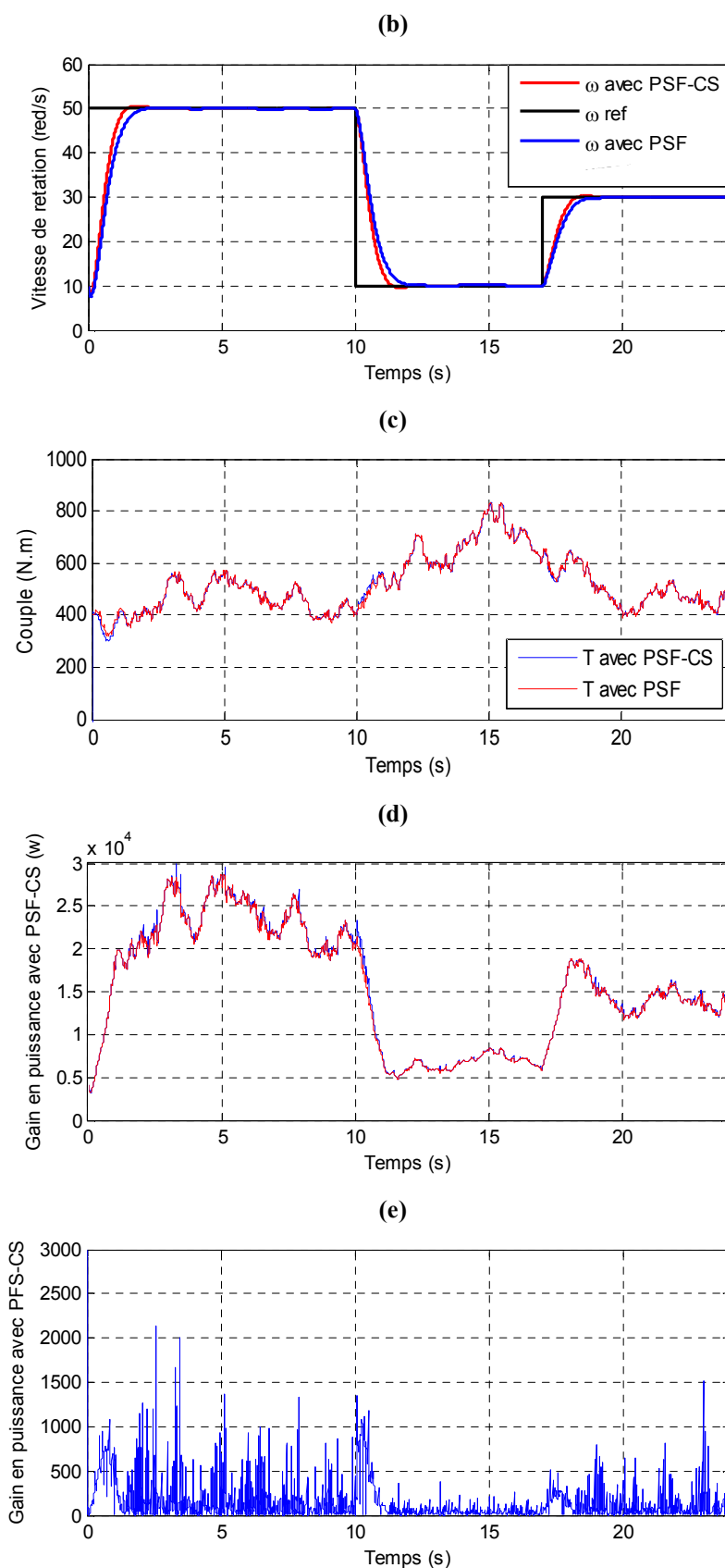


Figure. 2.31 : Résultats de simulation a) Vitesse de vent ;b) vitesse de rotation; c) couple moteur de la turbine ; e) puissance de l'éolienne ; e) gain en puissance.

2.4.2. Le raccordement de l'éolienne au réseau

Pour le raccordement des éoliennes à vitesse variable au réseau électrique on peut utiliser deux types de machine à simple ou à double alimentation comme montre les figures 2.32 et 2.33. Le contrôle des convertisseurs est généralement assuré à travers des stratégies sont similaires au commandes des PV raccordées au réseau (Paragraphe : 2.3.2.1) en tant que le DC/AC convertisseur assure la liaison.

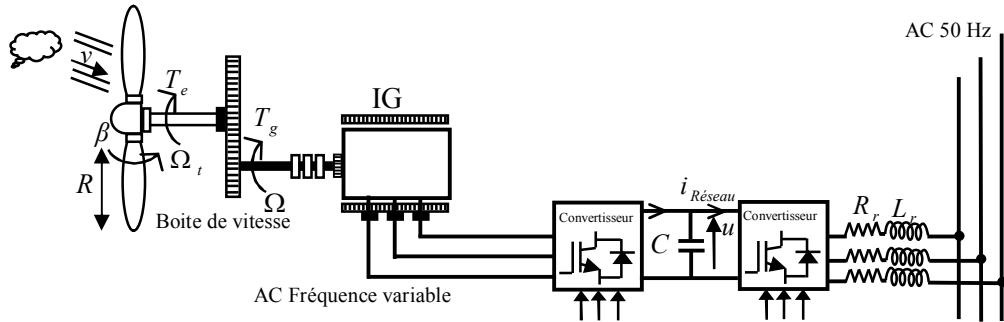


Figure. 2.32 : raccordement d'une éolienne au r réseau avec générateur à simple alimentation.

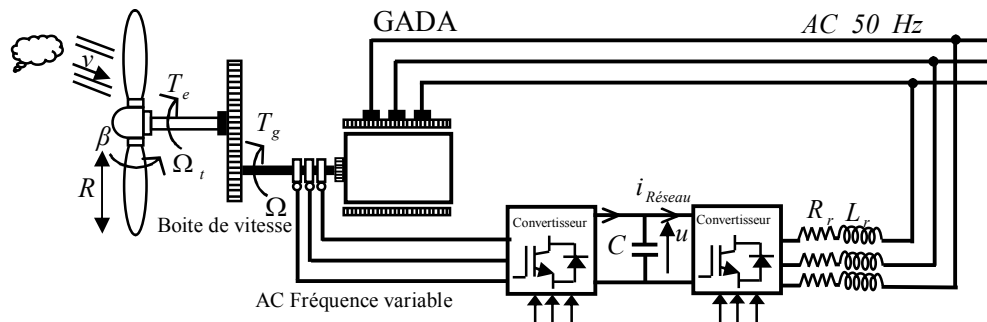


Figure. 2.33 : raccordement d'une éolienne au réseau avec générateur à double alimentation.

Il est possible aussi d'utiliser un convertisseur matriciel pour assuré le raccordement des éoliennes au réseau électrique (voir figure. 2.34).

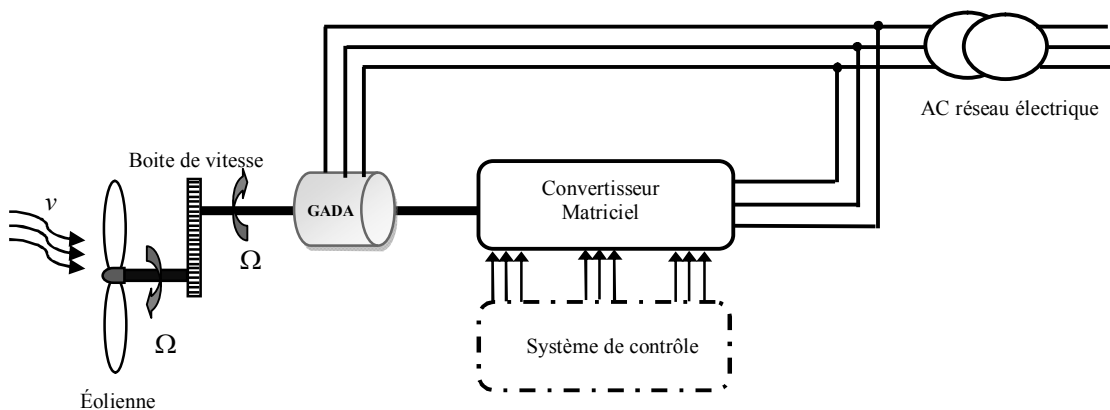


Figure. 2.34 : raccordement d'une éolienne au réseau en utilisant un convertisseur matriciel.

2.5. Étude d'une chaîne de production hybride PV/ éolienne

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable. Les nouvelles solutions technologiques proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et faire un savoir que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels très performants. Ces installations hybrides vont connaître, à moyen terme un certain intérêt grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaire. Nous allons présentés dans ce que suit les différents topologies et les caractéristiques du système hybride des sources photovoltaïque-éolien.

Les convertisseurs de puissance AC/DC, DC/AC et DC/DC sont toujours nécessaires pour les systèmes hybrides. Toutes les combinaisons possibles de structures de convertisseur de puissance avec une perte minimale sont traitées dans cette section. La faible variation de la puissance de sortie est l'avantage intrinsèque du système de production d'énergie hybride PV-éolienne. Dans la littérature, il n'y a pas beaucoup d'efforts notables faits pour optimiser la configuration du circuit et les opérations des systèmes hybrides de production d'énergie. Une telle optimisation des systèmes hybrides augmente la fiabilité et l'efficacité et réduit le coût. En ce qui concerne les contributions à la recherche, il n'y a pas de rapports pertinents sur l'intégration de grandes puissances photovoltaïques à la capacité de puissance au-delà de l'estimation de l'onduleur engagé. Dans les travaux existants sur les systèmes hybrides, les sources éoliennes et photovoltaïques sont couplées avec leurs convertisseurs de puissance appropriés [47]. Généralement, en raison du caractère extrêmement alternatif des sources d'énergie éolienne et photovoltaïques, les convertisseurs de puissance ne sont pas utilisés correctement.

De nombreux problèmes tels que la stabilité dynamique, l'injection d'harmoniques, la variation de tension et la puissance de circulation en ce qui concerne la pénétration de puissance élevée dans les sources hybrides connectées par onduleur doivent être explorés en profondeur [48]. Comme d'autres contraintes impératives, le coût et l'efficacité des systèmes hybrides ont une perspective de recherche remarquable. La figure. 2.35 représente le système hybride shunte PV-éolien exploité par le réseau AC en exploitant deux convertisseurs DC/DC/AC individuels. Chaque convertisseur est capable de transférer la puissance maximale générée vers le réseau. La topologie de circuit représentée sur la figure. 2.35 peut être réduite dans le circuit illustré sur la figure. 2.36 en raison des caractéristiques d'équilibrage du vent et de l'énergie à base de PV. Après la conversion de la topologie, les deux convertisseurs DC/DC ont été déplacés vers le bus DC.

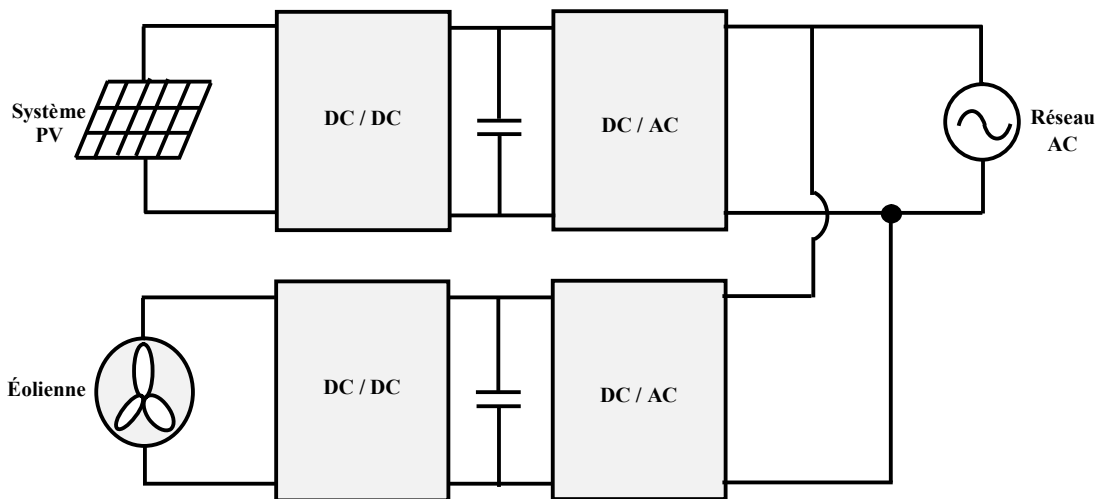


Figure. 2.35 : Système hybride PV/éolienne à courant alternatif.

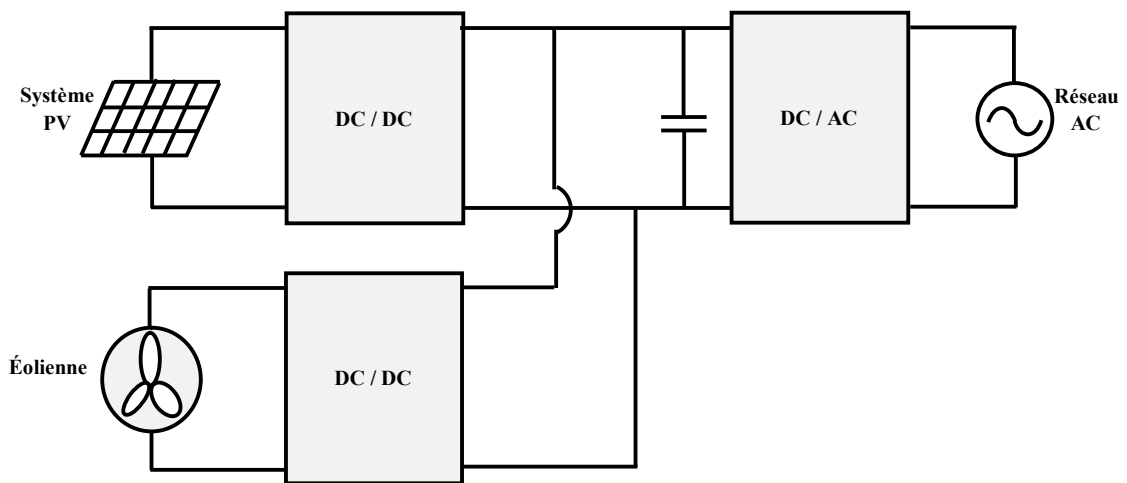


Figure. 2.36 : Système hybride PV/éolienne à courant continu.

Dans tout scénario, la topologie de circuit illustrée par la figure. 2.37 peut être rationalisée de manière similaire à la topologie de circuit de la figure. 38. Ici, un convertisseur DC/DC individuel a été remplacé par un convertisseur DC/DC à entrées multiples et un pont complet [49]. Le convertisseur DC/DC à entrée multiple divise la puissance maximale de l'éolienne ou du PV simultanément ou séparément. Un courant alternatif sinusoïdal est introduit dans le convertisseur de pont complet du réseau pour équilibrer le flux de puissance. La variation de la puissance d'entrée provenant du vent ou de la source photovoltaïque a un impact sur le bus DC avec un changement de tension continue. L'amplitude AC est incluse dans le réseau puis utilisée sur la valeur de base de la tension du bus DC. Finalement, l'approche pour la régulation de tension est considérée comme étant le problème critique pour la qualité d'alimentation de la ligne d'alimentation.

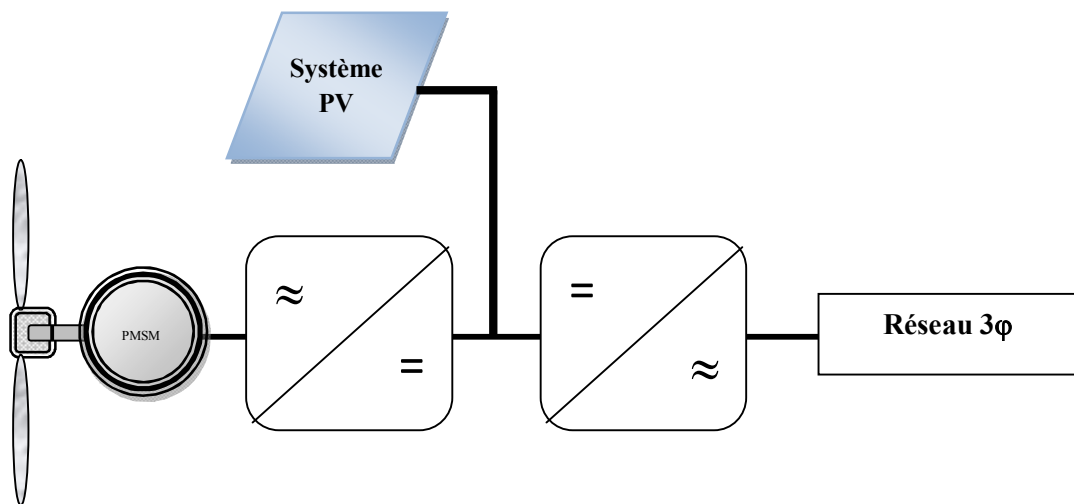


Figure. 2.37 : PMSM basé sur l'intégration photovoltaïque et éolienne.

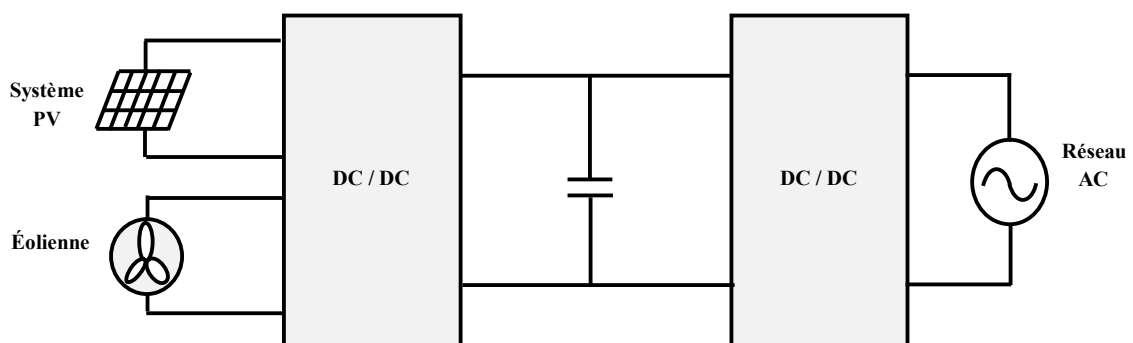


Figure. 2.38 : Système hybride PV/éolienne à entrées multiples.

Plusieurs amalgamations de systèmes hybrides PV-éoliennes par l'application de diverses techniques de conversion ont été proposées [50]. Les méthodologies existantes des convertisseurs hybrides PV- éoliennes sont généralement basées sur le VSI. La figure. 2.39 représente le système VSI utilisé sur les systèmes hybrides. Les convertisseurs DC-DC individuels intègrent une liaison DC typique avec toutes les sources d'entrée. Les sources PV les plus puissantes et le vent sont suivis à chaque état de fonctionnement via les convertisseurs DC-DC et leurs sorties sont fusionnés avec l'onduleur DC-AC. L'onduleur DC-AC dirige la tension du circuit intermédiaire avec le contrôle de modulation de largeur d'impulsion (MLI) synchronisé en cours pour obtenir le facteur de puissance d'harmonie au niveau du réseau.

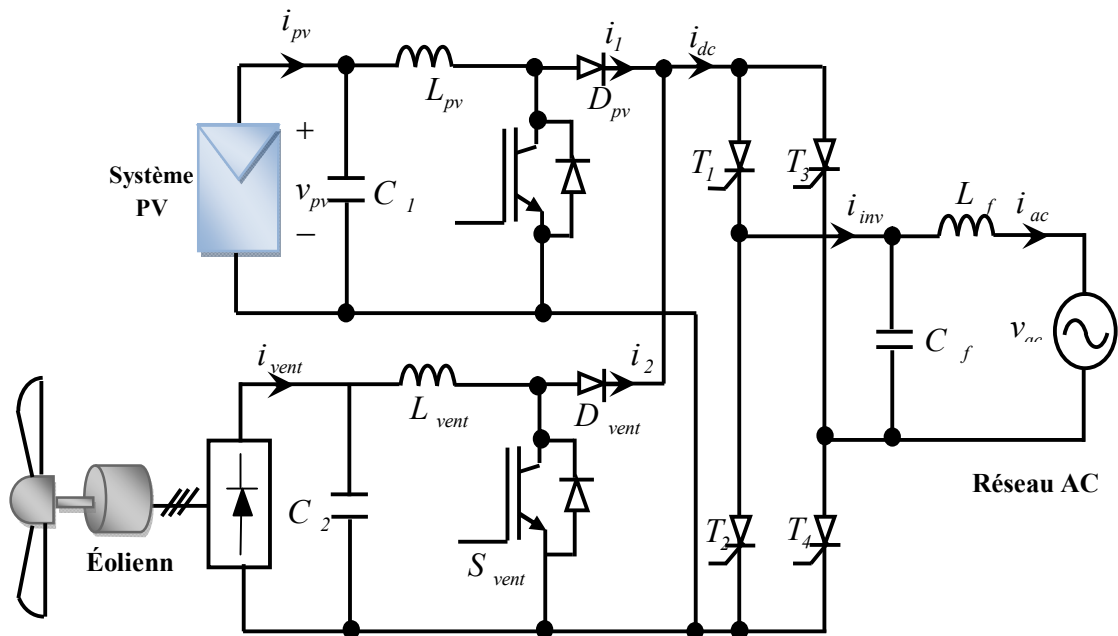


Figure. 2.39 : Système hybride basé sur VSI.

Le vent et le PV sont généralement considérés comme étant opposés, car les jours nuageux ont des vents forts, et pendant les jours ensoleillés, les vents soufflent sont doux dans la nature. Cette propriété aide le système PV / éolien en fournissant des entrées cohérentes pour la génération d'énergie constante sur le système autonome [51]. Pendant la crise du système électrique, pour éviter la destruction des équipements, le vent et le PV doivent être déconnectés du réseau et former des systèmes autonomes de production d'électricité. La tendance mondiale de l'installation de réseaux intelligents avec l'énergie éolienne et le PV exige que les gestionnaires de réseau de transport établissent une liaison de production distribuée (DG) pour maintenir le réseau en phase

de perturbation du réseau avec un approvisionnement convaincant. Dans des conditions inhabituelles, il est prévu que le système DG nuira au système avec des charges critiques sans initier des contrôles / actions appropriés. La figure. 2.40 montre le système DG avec stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES) qui résout le problème ci-dessus par réduction du niveau de courant de défaut. Le courant SMES est infusé au système par la méthode de compensation parallèle pour gérer les puissances réactive et réelle [52].

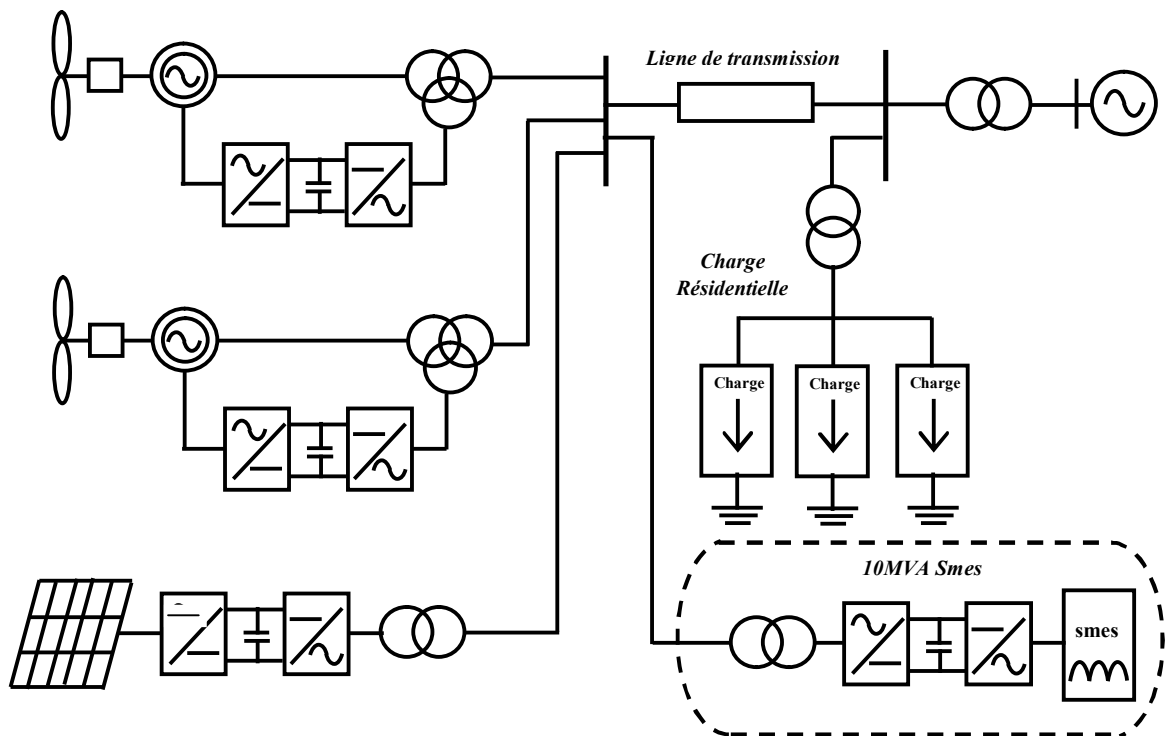


Figure. 2.40 : Système hybride avec SMES [52].

2.6. Conclusion

Une étude des chaînes de production et d'exploitation de l'énergie d'origine renouvelable à savoir le solaire photovoltaïque et l'éolienne et l'hybride des deux est examinée dans ce présent chapitre. Différentes topologies d'exploitation de l'énergie en mode autonome, le raccordement au réseau et le mode hybride des systèmes de conversion photovoltaïque et éolienne sont exposés. D'autre part, la maximisation de rendement de production de la chaîne est considérée. Pour cela, plusieurs algorithmes MPPT de maximisation de puissance sont développés. Le chapitre qui suit expose les techniques de stockage de l'énergie pour les systèmes renouvelables tout en proposant des chaînes durables et fiables.

2.7. Bibliographie

- [1] Malek, Hadi. "Control of grid-connected photovoltaic systems using fractional order operators." (2014).
- [2] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>
- [3] Salam, Zainal, Jubaer Ahmed, and Benny S. Merugu. "The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review." *Applied Energy* 107 (2013): 135-148.
- [4] Meneses, David, et al. "Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application." *IEEE Transactions on Power Electronics* 28.6 (2013): 2649-2663.
- [5] Ahmed, Nabil A., and Masafumi Miyatake. "A stand-alone hybrid generation system combining solar photovoltaic and wind turbine with simple maximum power point tracking control." *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International. Vol. 1. IEEE, 2006.*
- [6] Ahmed, Nabil A., Masafumi Miyatake, and A. K. Al-Othman. "Power fluctuations suppression of stand-alone hybrid generation combining solar photovoltaic/wind turbine and fuel cell systems." *Energy Conversion and Management* 49.10 (2008): 2711-2719.
- [7] Noguchi, Toshihiko, Shigenori Togashi, and Ryo Nakamoto. "Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system." *IEEE Transactions on Industrial electronics* 49.1 (2002): 217-223.
- [8] Scarpa, Vladimir VR, Simone Buso, and Giorgio Spiazzi. "Low-complexity MPPT technique exploiting the PV module MPP locus characterization." *IEEE transactions on industrial electronics* 56.5 (2009): 1531-1538.
- [9] Xiao, Weidong, et al. "Real-time identification of optimal operating points in photovoltaic power systems." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 53.4 (2006): 1017-1026.
- [10] Ozturk, Mustafa C., Dongming Xu, and José C. Príncipe. "Analysis and design of echo state networks." *Neural computation* 19.1 (2007): 111-138.
- [11] Morando, Simon, et al. "Fuel cells prognostics using echo state network." *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE. IEEE, 2013.*
- [12] Lukoševičius, Mantas. "A practical guide to applying echo state networks." *Neural networks: tricks of the trade. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. 659-686.*
- [13] Patel, Hiren, and Vivek Agarwal. "Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions." *IEEE transactions on industrial electronics* 55.4 (2008): 1689-1698.
- [14] Bonabeau, Eric, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. *Swarm intelligence: from natural to artificial systems. No. 1. Oxford university press, 1999.*
- [15] Dorigo, Marco, Mauro Birattari, and Thomas Stutzle. "Ant colony optimization." *IEEE computational intelligence magazine* 1.4 (2006): 28-39.
- [16] Shi, Yuhui. "Particle swarm optimization: developments, applications and resources." *evolutionary computation, 2001. Proceedings of the 2001 Congress on. Vol. 1. IEEE, 2001.*
- [17] Mirjalili, Seyedali, Seyed Mohammad Mirjalili, and Andrew Lewis. "Grey wolf optimizer." *Advances in Engineering Software* 69 (2014): 46-61.
- [18] Xu, Dongming, Jing Lan, and Jose C. Principe. "Direct adaptive control: an echo state network and genetic algorithm approach." *Neural Networks, 2005. IJCNN'05. Proceedings. 2005 IEEE International Joint Conference on. Vol. 3. IEEE, 2005.*
- [19] Shakweh, Y. "Evaluation of MV power stack topologies." (2000): 8-8.
- [20] Shakweh, Yahya. "MV inverter stack topologies." *Power engineering journal* 15.3 (2001): 139-149.
- [21] Malesani, Luigi, Paolo Mattavelli, and Simone Buso. "Robust dead-beat current control

- for PWM rectifiers and active filters." *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE. Vol. 2. IEEE, 1998.*
- [22] Malinowski, Mariusz, Marian P. Kazmierkowski, and Andrzej M. Trzynadlowski. "A comparative study of control techniques for PWM rectifiers in AC adjustable speed drives." *IEEE Transactions on power electronics* 18.6 (2003): 1390-1396.
- [23] Malinowski, Mariusz, et al. "Virtual-flux-based direct power control of three-phase PWM rectifiers." *IEEE Transactions on industry applications* 37.4 (2001): 1019-1027.
- [24] Escobar, Gerardo, et al. "Analysis and design of direct power control (DPC) for a three phase synchronous rectifier via output regulation subspaces." *IEEE Transactions on Power Electronics* 18.3 (2003): 823-830.
- [25] Kirilin, R. Lynn, Michael M. Bech, and Andrzej M. Trzynadlowski. "Analysis of power and power spectral density in PWM inverters with randomized switching frequency." *IEEE Transactions on Industrial electronics* 49.2 (2002): 486-499.
- [26] Malinowski, Mariusz, and Marian Kazmierkowski. "Simple direct power control of three-phase PWM rectifier using space vector modulation—A comparative study." *EPE journal* 13.2 (2003): 28-34.
- [27] Linder, Ariic, and Ralph Kennel. "Direct model predictive control—a new direct predictive control strategy for electrical drives." *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on. IEEE, 2005.*
- [28] Rodriguez, Jose, et al. "State of the art of finite control set model predictive control in power electronics." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 9.2 (2013): 1003-1016.
- [29] Sarinana, A., et al. "A novel fixed switching frequency controller of a three-phase voltage source inverter." *8th European Conference on Power Electronics and Applications. EPE'99. 1999.*
- [30] Tsili, Marina, Christos Patsiouras, and Stavros Papathanassiou. "Grid code requirements for large wind farms: A review of technical regulations and available wind turbine technologies." *Proceedings of EWEC. 2008.*
- [31] Caliao, Nolan D. "Dynamic modelling and control of fully rated converter wind turbines." *Renewable Energy* 36.8 (2011): 2287-2297.
- [32] De Broe, Alex M., S. Drouilhet, and Va Gevorgian. "A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications." *IEEE Transactions on energy conversion* 14.4 (1999): 1630-1635.
- [33] Bianco, GLo, O. Honorati, and F. Mezzetti. "Small-size stand alone wind energy conversion system for battery-charging." *TECHNOLOGICAL EDUCATIONAL INSTITUTE, IRAKLIO,(GREECE). 1 (1996): 62-65.*
- [34] Spee, Rene, Shibashis Bhowmik, and Johan HR Enslin. "Novel control strategies for variable-speed doubly fed wind power generation systems." *Renewable Energy* 6.8 (1995): 907-915.
- [35] Abdelkafi, Achraf, and Lotfi Krichen. "New strategy of pitch angle control for energy management of a wind farm." *Energy* 36.3 (2011): 1470-1479.
- [36] Grimble MJ, Johnson MA. *Optimal Control of Wind Energy Systems; 2008.*
- [37] Chen, Zhe, Josep M. Guerrero, and Frede Blaabjerg. "A review of the state of the art of power electronics for wind turbines." *IEEE Transactions on power electronics* 24.8 (2009): 1859-1875.
- [38] Lopez, Hugo Eduardo Mena. *Maximum power tracking control scheme for wind generator systems. Diss. Texas A & M University, 2008.*
- [39] Quincy, W. *Maximum wind energy extraction strategies using power electronic converters. Diss. PhD. dissertation, Univ. of New Brunswick, Canada, 2003.*
- [40] Shirazi, Meisam, Abbas Hooshmand Viki, and Omid Babayi. "A comparative study of maximum power extraction strategies in PMSG wind turbine system." *Electrical Power &*

- Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE. IEEE, 2009.
- [41] Simoes, Marcelo Godoy, Bimal K. Bose, and Ronald J. Spiegel. "Design and performance evaluation of a fuzzy-logic-based variable-speed wind generation system." *IEEE Transactions on Industry Applications* 33.4 (1997): 956-965.
 - [42] Trinh, Quoc-Nam, and Hong-Hee Lee. "Fuzzy logic controller for maximum power tracking in PMSG-based wind power systems." *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence* (2010): 543-553.
 - [43] Lee, Chun-Yao, et al. "Neural networks and particle swarm optimization based MPPT for small wind power generator." *World Academy of Science, Engineering and Technology* 60.2009 (2009): 17-23.
 - [44] Lin, Whei-Min, and Chih-Ming Hong. "Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system." *Energy* 35.6 (2010): 2440-2447.
 - [45] Yang, Xin-She, and Suash Deb. "Cuckoo search via Lévy flights." *Nature & Biologically Inspired Computing*, 2009. NaBIC 2009. World Congress on. IEEE, 2009.
 - [46] Payne, Robert B., and Michael D. Sorensen. *The cuckoos*. Vol. 15. Oxford University Press, 2005.
 - [47] Li, Jianwei, et al. "Design/test of a hybrid energy storage system for primary frequency control using a dynamic droop method in an isolated microgrid power system." *Applied Energy* 201 (2017): 257-269.
 - [48] Jamal, Taskin, et al. "Technical challenges of PV deployment into remote Australian electricity networks: a review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (2017): 1309-1325.
 - [49] Borowy, Bogdan S., and Ziyad M. Salameh. "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system." *IEEE Transactions on energy conversion* 11.2 (1996): 367-375.
 - [50] Chen, Yaow-Ming, et al. "Multi-input inverter for grid-connected hybrid PV/wind power system." *IEEE transactions on power electronics* 22.3 (2007): 1070-1077.
 - [51] Li, River TH, et al. "Use of hybrid PWM and passive resonant snubber for a grid-connected CSI." *IEEE Transactions on Power Electronics* 25.2 (2010): 298-309.
 - [52] Yunus, AM Shiddiq, A. Abu-Siada, and M. A. S. Masoum. "Application of SMES unit to improve the high-voltage-ride-through capability of DFIG-grid connected during voltage swell." *Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT), 2011 IEEE PES. IEEE*, 2011.

*Chapitre 3 : Renforcement de la chaîne renouvelable en
utilisant des systèmes de stockages*

3.1. Introduction

Les études sur les sources d'énergie alternatives éoliennes et solaires ont pris de l'importance, car il est plus difficile de répondre aux besoins énergétiques, croissants du monde, en combustibles fossiles de manière économique. L'utilisation de ces systèmes renouvelables présente certains avantages par rapport aux grandes centrales, telles que la qualité de l'environnement, la qualité de service élevée, le service ininterrompu, les économies en coûts, la production sur site et l'extensibilité. En raison de leur nature intermittente, les ressources éoliennes et solaires dans une zone donnée peuvent être complémentaires sur une base quotidienne et/ou saisonnière, une source d'énergie de soutien est nécessaire pour augmenter le degré de contrôlabilité et d'opérabilité des sources hybride d'énergie renouvelable. Traditionnellement, cette fonction est réalisée par un système de stockage de l'énergie (ESS) tel que batterie et hydrogène (c.-à-d. Fuel Cell 'FC', électrolyseur et réservoir de stockage d'hydrogène). Le système hybride d'énergie renouvelable combine une ou plusieurs sources d'énergie renouvelable avec un système de stockage d'énergie et de conditionnement d'énergie peuvent améliorer les performances de la production. Toutes sources renouvelables et ESS sont connectés ensemble central aux convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont conçus pour fournir de l'énergie à partir des sources d'énergie, assurant un fonctionnement stable, durable et fiable. Par conséquent, la fiabilité de la commande du convertisseur est primordiale pour répondre à ces besoins.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'avantage de l'utilisation des systèmes de stockage de l'énergie pour une chaîne de production d'origine renouvelable. Nous nous intéressons au type de stockage indirect. L'hydrogène fait l'objet principal de l'étude. Nous présentent en début la modélisation et la simulation en utilisant le logiciel MatLab d'une chaîne de production hybride photovoltaïque hydrogène en mode autonome. Aussi, un banc d'essai et considéré. Enfin, une étude d'une application intéressante est présentée elle consiste au raccordement de la chaîne hybride au réseau électrique en utilisant la technique de commande par mode glissant.

3.2. Stockage de l'énergie électrique

Le stockage de l'énergie se définit comme l'action consistant à placer une quantité d'énergie dans un environnement donné, fixe ou amovible, pour permettre une utilisation ultérieure. Ce stockage est maîtrisé technologiquement pour ce qui est des combustibles primaires (charbon, pétrole brut, etc.) ou secondaires (produits pétroliers, etc.) mais dispose d'un fort potentiel d'amélioration en ce qui concerne la chaleur (pour le chauffage et la climatisation des bâtiments) et l'électricité. Dans un système électrique hypothétique qui s'appuierait sur une seule source d'énergie primaire totalement flexible, le recours au stockage d'électricité n'aurait pas d'intérêt économique, puisqu'il ne ferait qu'ajouter des coûts d'investissements à des économies de stockage-déstockage négatives (stocker de l'électricité à partir d'une énergie primaire puis la déstocker avec perte de rendement est plus coûteux qu'utiliser directement cette énergie primaire sans l'intermédiaire du stockage).

L'intérêt économique du stockage d'électricité provient donc fondamentalement de la diversité du mix électrique : produire et stocker de l'électricité à partir d'une source primaire de coût variable faible ou nul (combustible nucléaire, éolien ou solaire PV) et temporairement en excès de disponibilité (par rapport au meilleur usage immédiat de cette source primaire qui est de satisfaire la demande instantanée d'électricité au moindre coût) durant les «heures creuses» de demande, est intéressant dans la mesure où l'énergie stockée pourra être déstockée à un autre moment (« heures pleines ») et éviter ainsi le recours à des sources primaires d'énergies plus chères (charbon et gaz). Dans sa globalité, le stockage de l'électricité vise à répondre à quatre problématiques essentielles:

- la récupération d'une production excédentaire issue principalement de productions renouvelables intermittentes ;
- un déstockage pour compenser le caractère intermittent des dites productions ;
- un déstockage pour alimenter un pic de consommation ponctuel ;
- un déstockage pour compenser une défaillance du réseau.

Aujourd'hui, le stockage direct de l'énergie électrique est très difficile à réaliser. Néanmoins, il est possible de convertir cette énergie en une énergie stockable (chimique, potentielle, cinétique, etc.) qui pourra ensuite être retransformée en énergie électrique. Cette double conversion a pour conséquence des déperditions parfois

considérables. La nature du stockage est donc diverse, et dépend de l'usage futur de l'énergie stockée. Des caractéristiques telles que le temps de décharge, la puissance et l'autonomie orientent ainsi les technologies et les prix. Le stockage peut être stationnaire (centralisé) ou mobile (stockage embarqué), de faible capacité ou de forte capacité. L'électricité peut donc être transformée de manière réversible en différentes catégories d'énergie stockables :

- énergie mécanique : barrage hydroélectrique, Station de transfert par énergie de pompage, stockage d'énergie par air comprimé, stockage par volant d'inertie ;
- énergie électrochimique : piles, batteries, hydrogène ;
- électromagnétique : bobines, supraconducteurs, supercondensateurs ;
- thermiques.

Dans des domaines aussi divers que la mobilité, la gestion des productions renouvelables dans le réseau ou l'indépendance énergétique, la question du stockage de l'énergie électrique est amenée à jouer un rôle majeur au cours des prochaines années. Alors, les systèmes de stockage d'énergie (ESS) ont fait l'objet d'une attention accrue en raison de leur rôle important dans la gestion active des systèmes d'approvisionnement en énergie. Alimentée par la part croissante des sources renouvelables intermittentes dans l'approvisionnement énergétique actuel, équilibrer la demande d'énergie et l'approvisionnement en énergie au fil du temps devient de plus en plus difficile. Les systèmes de stockage sont reconnus comme une technologie clé pour relever ce défi en stockant l'énergie et en la convertissant en cas de besoin. Pour les systèmes de l'énergie renouvelables généralement deux principaux types de stockage sont utilisés : le stockage électro chimique et le stockage sous forme hydrogène.

- **Stockage électro chimique :** Ce mode de stockage nous conduit à évoquer essentiellement les batteries. Les batteries (ou accumulateurs) sont des systèmes électrochimiques, qui stockent de l'énergie sous forme chimique et la restituent sous forme électrique. Les batteries peuvent être électriquement rechargées contrairement aux piles. Le courant est produit par la circulation d'électrons entre deux électrodes :
 - une électrode positive composée d'un corps oxydant, capable d'attirer des électrons ;
 - une électrode négative composée d'un corps réducteur, capable de céder des électrons.

Ainsi, une batterie se caractérise par un couple « oxydant-réducteur » (par exemple : plomb-oxyde de plomb, nickel-cadmium...) échangeant des électrons. Les deux électrodes (ou plaques) baignent dans une solution électrolytique (ou électrolyte). Utilisées comme réserves massives d'énergie, les batteries peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou quelques jours. Elles peuvent résister à un certain nombre de cycles charge/décharge.

- **Mode de stockage chimique au moyen de l'hydrogène :** L'hydrogène peut devenir un vecteur de stockage selon le schéma suivant : l'électricité excédentaire est utilisée pour réaliser une électrolyse de l'eau (via un électrolyseur) ; elle est ainsi convertie en hydrogène H_2 stockable sous forme gazeuse, liquide ou solide. Quand le besoin se manifeste, cette énergie est ensuite restituée via, par exemple, une pile à combustible, qui reconvertit l'hydrogène et l'oxygène en électricité (et en eau) pendant les périodes de forte consommation.

3.3. Étude d'une chaîne de production hydrogène photovoltaïque

La chaîne représentée par la Figure.3.1 se compose d'un générateur photovoltaïque (PVG), un électrolyseur (ELECT), une pile à combustible (PAC), un réservoir d'hydrogène et une charge résistive variable.

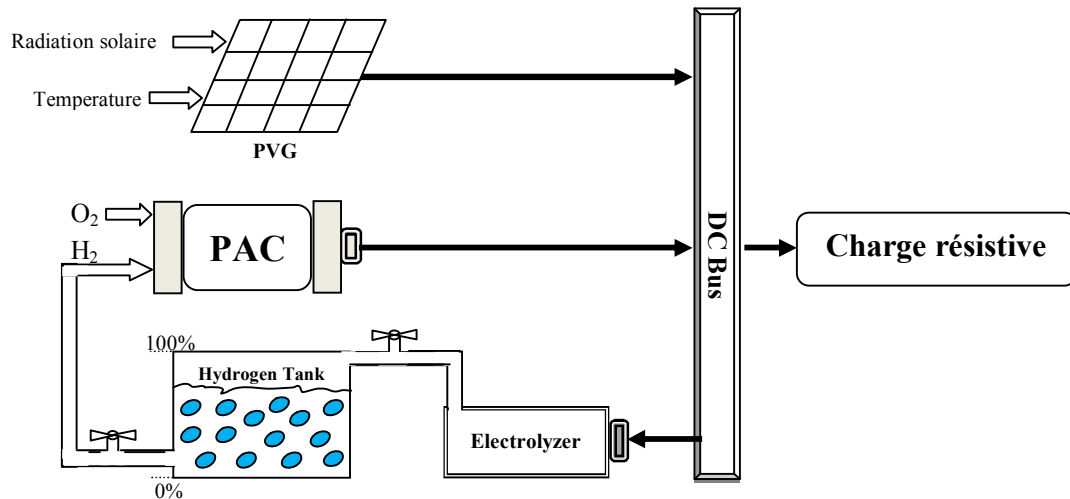


Figure. 3.1: La chaîne de production d'hydrogène photovoltaïque.

Le principe de fonctionnement de la chaîne est donné par trois points :

- Si la puissance générée par le PVG est égale à la demande de la charge, toute la puissance produite du PVG est utilisée seule et directement pour assurer la demande.

- S'il y a un surplus de puissance de la part du PVG, ce surplus est utilisé pour la production d'hydrogène afin de stocker dans le réservoir.
- Si la demande supérieure à la production du PVG, la PAC intervient et recouvre le manque de la demande et tout le produit du PVG est utilisé par la charge sans production du H₂.

3.3.1. Modélisation mathématique

3.3.1.1. Modèle du générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est le composant principal du système PV. L'association d'un certain nombre de cellules en série et en parallèle crée le module PV. La même opération est appliquée pour les modules afin de créer le générateur PV. Pour les systèmes composés de N_S x N_P modules, l'équation de courant donnée par [1]:

$$I_{PV} = N_P \cdot I_{ph} - N_P \cdot I_0 \left(\exp \left(\left(\frac{1}{A \cdot K \cdot \frac{T}{q}} \right) \cdot \left(\frac{V_{PV}}{N_S} + \frac{R_S \cdot I_{PV}}{N_P} \right) \right) - 1 \right) - \frac{N_P}{R_{sh}} \cdot \left(\frac{V_{PV}}{N_S} + \frac{R_S \cdot I_{PV}}{N_P} \right) \quad 3.1$$

Avec: I_{ph} est le courant de la diode; I₀ est le courant de saturation de la diode; K est la constante de Boltzmann; T est la température; q est la charge d'électrons; V_{PV} est la tension de la sortie du générateur; I_{PV} est le courant; R_S est la résistance en série; R_{Sh} est la résistance en shunt; N_S est le nombre de modules en série; N_P est le nombre de modules parallèles.

3.3.1.2. Modèle de la pile à combustible

Sans aucun processus thermique ou mécanique, une pile à combustible est un dispositif de conversion électrochimique de l'énergie chimique contenue dans un combustible en une énergie électrique produite [2]. La réaction électrochimique produit de l'énergie électrique, de l'eau et de la chaleur. Une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de combustibles et d'oxydants dont l'hydrogène est le carburant par excellence considérant qu'il possède une plus haute réactivité électrochimique en comparaison avec les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou alcools. Pour l'oxydant, l'oxygène a été reconnu comme le plus efficace à cause de sa haute réactivité et son abondance dans l'air [3]. Généralement, les piles à combustible de type proton exchange membrane (PEM) sont les plus utilisées pour les productions renouvelables. Le principe de fonctionnement d'une PEM est décrit par une réaction d'oxydoréduction

électrochimique. En fait, l'hydrogène et l'oxygène réagissent pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon les réactions chimiques suivantes :

- À l'anode : Oxydation de l'hydrogène $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- À la cathode : Réduction de l'oxygène $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
- Réaction globale : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Ces réactions s'effectuent au sein d'une structure essentiellement composée d'électrodes appelées « l'anode et la cathode » qui jouent le rôle de conducteurs électroniques, et sont séparées par un polymère électrolyte solide représentant le conducteur protonique. Sur l'anode, les ions issus de la dissociation de l'hydrogène en présence d'un catalyseur traversent le polymère électrolyte en direction de la cathode où ils sont combinés avec l'oxygène et les électrons de la cellule adjacente pour former de l'eau. Ces derniers qui apparaissent du côté de l'anode sont employés dans le circuit électrique externe avant leur retour à la cathode [4]. Comme montre la Figure. 3.2, la tension réelle U_{FC} est inférieure à sa valeur en circuit ouvert U_{OC} dans une pile à combustible en divers mécanismes de pertes irréversibles. Ces pertes sont Principalement à partir de trois sources, c'est-à-dire, d'activation overpotential η_{act} , Concentration overpotential η_{conc} , et Ohmic overpotential η_{ohm} .

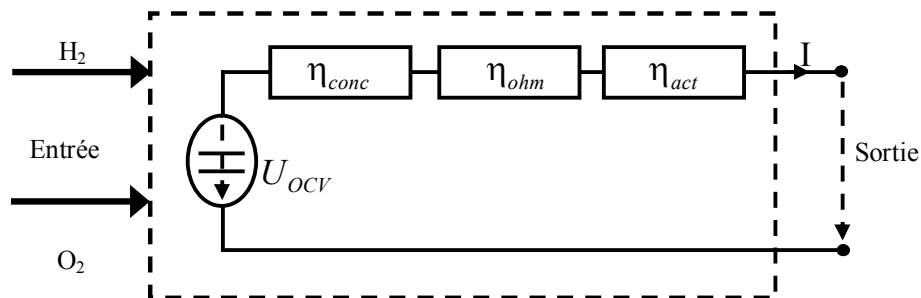


Figure. 3.2: Modèle de cellule d'une PAC.

Ainsi, la tension réelle des cellules U_{FC} peut être représentée par [5] :

$$U_{FC} = U_{OCV} - \eta_{act} - \eta_{conc} - \eta_{ohm} \quad 3.2$$

La tension en circuit ouvert U_{OCV} peut être exprimée aussi comme un changement dans l'énergie libre de Gibbs pour la réaction de l'hydrogène et de l'oxygène. Dans des conditions différentes des conditions normales, U_{OC} est donnée par:

$$U_{ocv} = 1.2297 + (T - 298.15) \frac{\Delta s_0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} \times P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_0^{\frac{3}{2}}} \right) \quad 3.3$$

Le potentiel d'activation d'une pile à combustible est lié à la lenteur des réactions qui se produisent à la surface d'électrodes. L'activation de l'électrode peut être décrite par l'équation de Butler-Volmer [6]:

$$j = j_0 \left[e^{(2\alpha F/RT)n_{act}} - e^{(2(1-\alpha)F/RT)n_{act}} \right] \quad 3.4$$

Où j_0 est la densité de courant d'échange sur le catalyseur. Il est étroitement lié à la température de fonctionnement et donnée par [7, 8] :

$$j_0 = j_0^{ref} z(C_{O_2})^\alpha (C_{H_2O})^{1-\alpha} e^{(-\Delta G/R)/[(1/T)-(1/298.15)]} \quad 3.5$$

La concentration de combustible et d'oxydant est réduite différents points dans les canaux de gaz des piles à combustible et à la soupape d'entrée de la pile. Cette perte devient importants à des courants plus élevés lorsque le combustible et l'oxydant sont utilisé à des taux plus élevés et la concentration dans le canal de gaz est à son minimum.

$$n_{conc.a} = \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{j_a}{j_L} \right) \quad a \quad 3.6$$

$$n_{conc.c} = \frac{RT}{4F} \ln \left(1 - \frac{j_a}{j_L} \right) \quad b$$

Les pertes ohmiques qui se produisent dans une PAC comprennent la résistance due au flux de protons (courant ionique) dans la membrane électrolyte et à la résistance due au flux d'électrons (courant électrique) à travers les conducteurs électriques (tels que GDL, plaque bipolaire, Etc.) [9]. Par conséquent, la résistance ohmique totale est une combinaison des résistances électroniques et ioniques. Les pertes ohmiques dues au transport des électrons obéissent à la loi de l'Ohm [10]:

$$n_{ohm.e} = I \times R_{ec} \quad 3.7$$

Où : I est la densité de courant traversant la cellule et R_{ec} est la résistance électrique équivalente de la cellule. Quant à la perte ohmique due au transport des protons dans la membrane électrolytique, son sur potentiel (ohm) peut également être calculé par :

$$n_{ohm.m} = I \times R_{ic} \quad 3.8$$

Où : R_{ic} est la membrane d'électrolyte à résistance ionique, qui est calculée a partir de:

$$R_{ic} = \frac{d_e}{\sigma_m \times A_c} \quad 3.9$$

Où : d_e est la largeur de l'électrode, A_c est le corps d'électrolyte et σ_m la conductivité ionique de l'électrolyte membrane est calculée par [11,12]:

$$\sigma_m = (0.005139\lambda - 0.00326) \times \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad 3.10$$

Ainsi, le sur potentiel total ohmique dans la pile à combustible peut être représenté par :

$$n_{ohm} = n_{ohm.e} + n_{ohm.m} \quad 3.11$$

3.3.1.3. Modèle de l'électrolyse de l'eau

Un électrolyseur d'eau de type alcalin se compose d'un certain nombre de cellules connectées en série. Le modèle de l'électrolyseur (Figure. 3.3) est basé sur les caractéristiques des cellules individuelles.

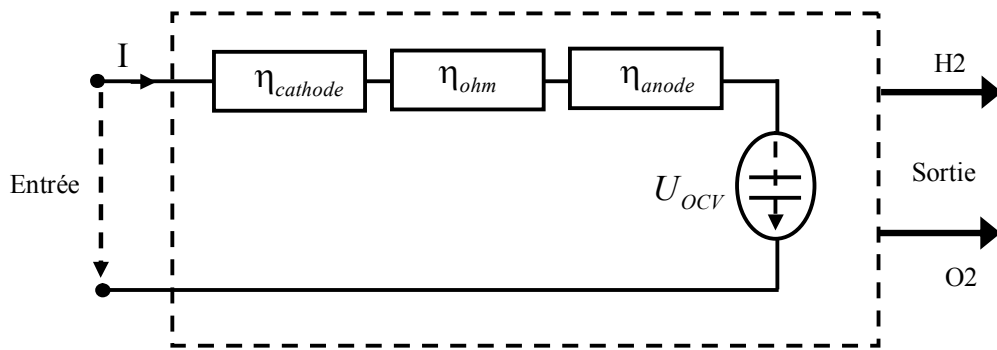


Figure. 3.3: Modèle de l'électrolyseur alcaline.

La tension de fonctionnement et les débits massiques d'hydrogène et d'oxygène sont tous effectués alors que les valeurs correspondantes pour l'ensemble de l'électrolyseur sont simplement multipliées par le nombre de séries cellules. Cette méthode est également utilisée avec le modèle de la pile à combustible PEM. L'équation qui décrit le comportement de l'électrolyseur est:

$$U_{actual} = U_{ocv} + n_{anode} + n_{cathode} + n_{ohm} \quad 3.12$$

C'est la même forme que pour la pile à combustible, alors que les surtensions représentent ici, le surplus de tensions électriques nécessaires pour réactions des électrodes et de surmonter les Gradients de concentration. Toutes les surtensions dépendent la densité de courant sont calculées de la même manière que la PAC. L'équation 3.13 exprime la théorique d'équilibre de la tension U_{OCV} de l'électrolyseur alcalin sous conditions de travail efficaces, telles que la pression:

$$U_{ocv} = U_0 + \frac{RT}{2F} \left[\left(\frac{PH_2 - PH_2O}{P_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{PH_2O.r}{PH_2O} \right) \right] \quad 3.13$$

CHAPITRE 3 Renforcement de la chaine renouvelable en utilisant des systèmes de stockages

Où : U_0 est la tension de cellule réversible dans des conditions standard, P_{H_2} , la pression de fonctionnement de l'hydrogène et, P_{H_2O} , l'eau comme vapeur partielle. Encore une fois, la surpuissance ohmique peut être représenté par :

$$n_{ohm} = I \times R_{el} \quad 3.14$$

Où : R_{el} est la résistance interne de l'électrolyseur, et donnée par [13] :

$$R_{el} = \frac{d_e}{\sigma_k \times A_c} \quad 3.15$$

La conductivité électrique σ_k de l'électrolyte (potassium Hydroxyde) est donnée par [10] :

$$\begin{aligned} \sigma_k = & 2.62 \times C_{KOH} + 0.067C_{KOH}(T - 273.15) - 4.8 \times C_{KOH}^2 - 0.088 \\ & \times C_{KOH}^2(T - 273.15) \end{aligned} \quad 3.16$$

Où : C_{KOH} est la concentration massique de potassium Hydroxyde et K_{OH} est une solution alcaline à la cathode et à l'anode. Selon les réactions partielles pendant l'électrolyse, la densité de courant totale j se compose de deux parties :

$$j = j_a + j_c \quad 3.17$$

Les surcharges d'activation à la cathode et à l'anode dans l'électrolyseur sont calculées à l'aide des équations Butler-Volmer:

$$j_c = j_{o,c}^{ref} \left[e^{\frac{2\alpha_c F}{RT} n_{act,c}} - e^{\frac{2(1-\alpha_c)F}{RT} n_{act,c}} \right] \quad (1) \quad 3.18$$

$$j_a = j_{o,a}^{ref} \left[e^{\frac{2\alpha_a F}{RT} n_{act,a}} - e^{\frac{2(1-\alpha_a)F}{RT} n_{act,a}} \right] \quad (2)$$

Les taux de production d'hydrogène (m_{H_2}) et l'oxygène (m_{O_2}) Dans une cellule d'électrolyseur peut être calculée par :

$$m_{H_2} = 2m_{O_2} = N_s \times \varepsilon_F \frac{I}{2F} \quad 3.19$$

Où : ε_f et N_s sont l'efficacité faradique et le nombre de cellules série, respectivement.

3.3.1.4. *Modèle de réservoir du H₂*

Le rôle du réservoir d'hydrogène est de stocker H₂ produit par Électrolyse de l'eau à l'aide d'électrolyseur alcalin. Le nombre de moles de H₂ dans le réservoir (N_{H₂}) sont données par la différence entre le taux de H₂ généré par l'électrolyseur (N_{H₂}; in) et le taux de H₂ consommé par la PAC (N_{H₂}; out) [14]. Il est exprimé comme suit :

$$C-H_2 = \frac{N_{H_2}}{N_{H_2M}} * 10 \tag{3.20}$$

La teneur en hydrogène dans le réservoir donné en pourcentage en utilisant l'équation :

$$N_{H_2} = \int (N_{H_2in} - N_{H_2out}) dt \tag{3.21}$$

Où : N_{H_{2M}} est le nombre de moles de H₂ dans le réservoir est en position plein.

3.3.2. **Simulations et analyses**

La simulation de la chaine de production d'hydrogène photovoltaïque effectuée, en utilisant le logiciel MatLab/Simulink, a pour but de tester et d'analyser le fonctionnement des procédés proposés pour conditions climatique variables représentée par l'irradiation solaire (Figure. 3.4) et une charge variable (Figure. 3.5). Les paramètres opérationnels du PVG, le module PAC et l'électrolyseur sont données par l'annexe A.

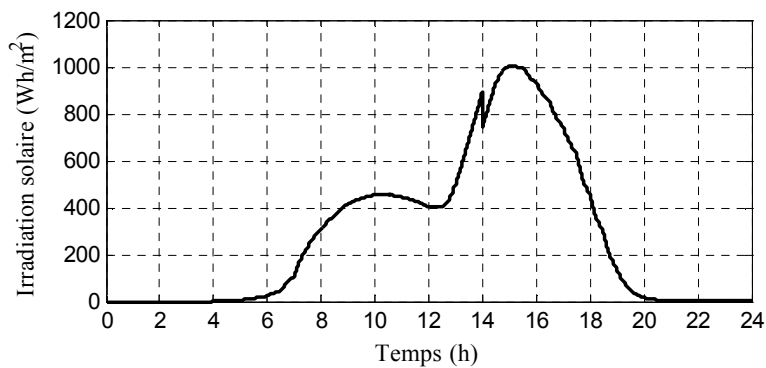


Figure. 3.4: Profile de l'ensoleillement.

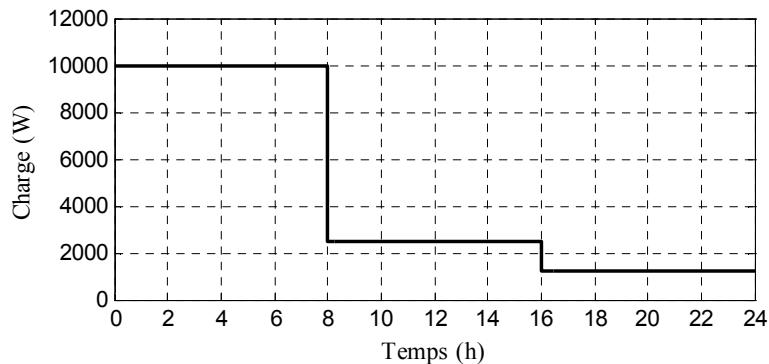


Figure. 3.5: Consigne de la charge.

La figure. 3.6 montre une bonne poursuite de la charge avec un bon rejet. Cette consommation est la somme des deux puissances produites de la part du GPV et de la PAC comme représente la figure. 3.7. Il est noté aussi qu'il y a une complémentarité de livraison de la puissance vers la charge avec un surplus de puissance utilisée pour la production de l'hydrogène de la part de l'électrolyseur (voir figure. 3.8). Par conséquent, le niveau d'hydrogène dans le réservoir montré par la figure. 3.9 est en relation avec la production et la consommation de H_2 .

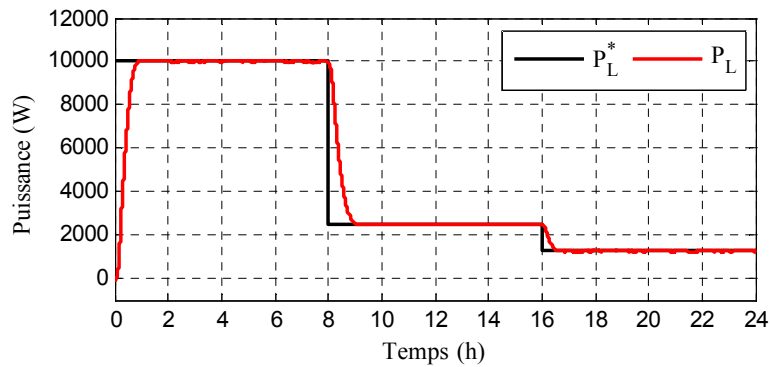


Figure. 3.6: Puissance de la charge.

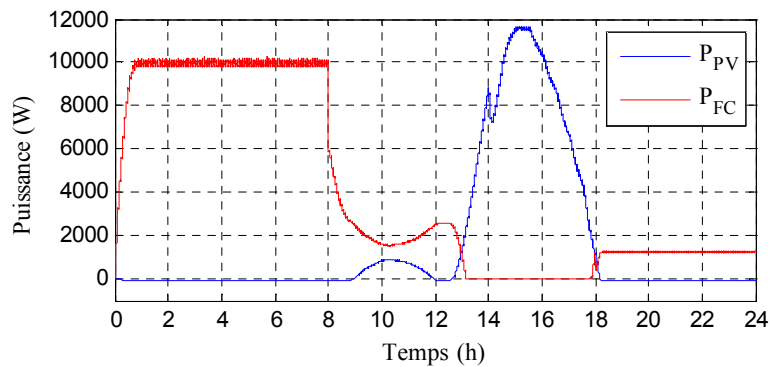


Figure. 3.7: Puissance du GPV et de la PAC.

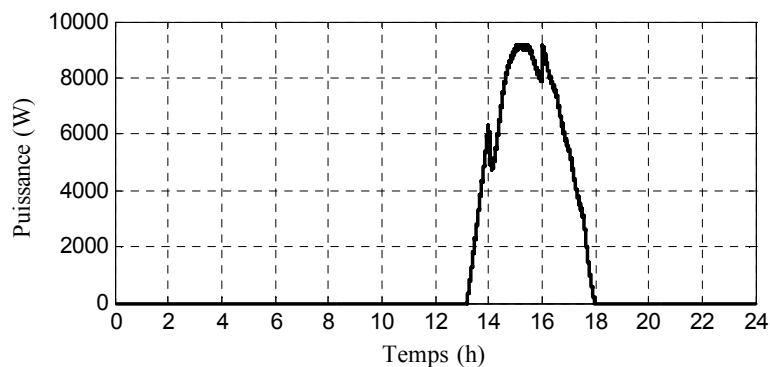


Figure. 3.8: Puissance de l'électrolyseur.

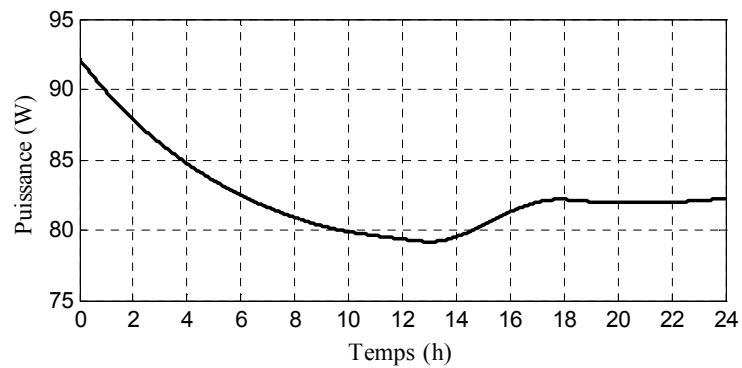


Figure. 3.9: Niveau de l'hydrogène dans le réservoir.

3.3.3. Banc d'essai

Un banc d'expérimentation (Figure. 3.10, 'lieu : Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) → Division Hydrogène Énergies Renouvelables, Bouzeria à Alger') associé d'une chaîne de conversion Analogique/numérique utilisé pour relevé les résultats. Pour tester le comportement de la chaîne en termes performances de conversion des gaz et de potentiel de stockage de H₂, le banc est utilisé pour une simulation d'une journée complète pour chacune des quatre saisons à une charge constante de 3KW de consommation stable.

Les quatre scénarios de simulation, présentés dans ce que suit, montrent le potentiel du système pour la conversion des gaz et les performances de stockage de H₂ en fonction des conditions climatiques tant que la charge est constante.



Figure. 3.10 : Système de production d'hydrogène photovoltaïque.

➤ Scénario 1 : 13/07/2016

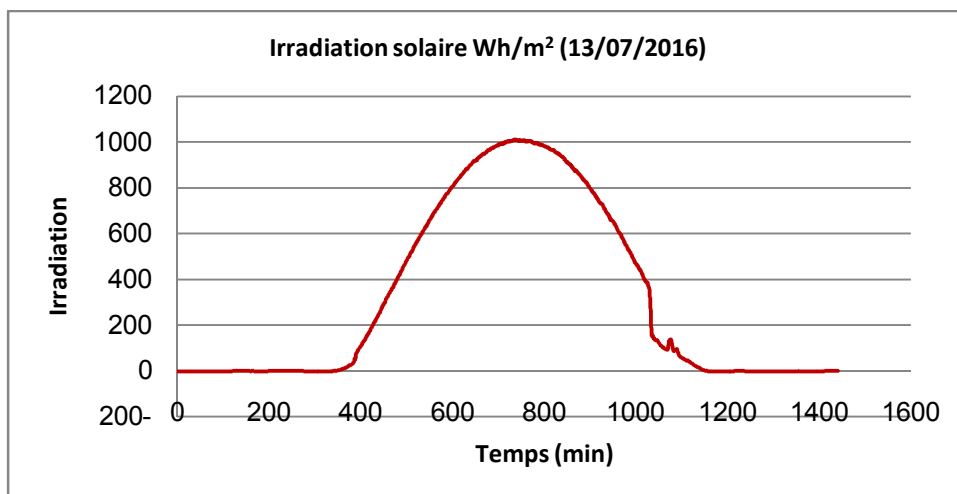


Figure. 3.11: Profil de l'irradiation solaire (13/07/2016) région de Bouzeria.

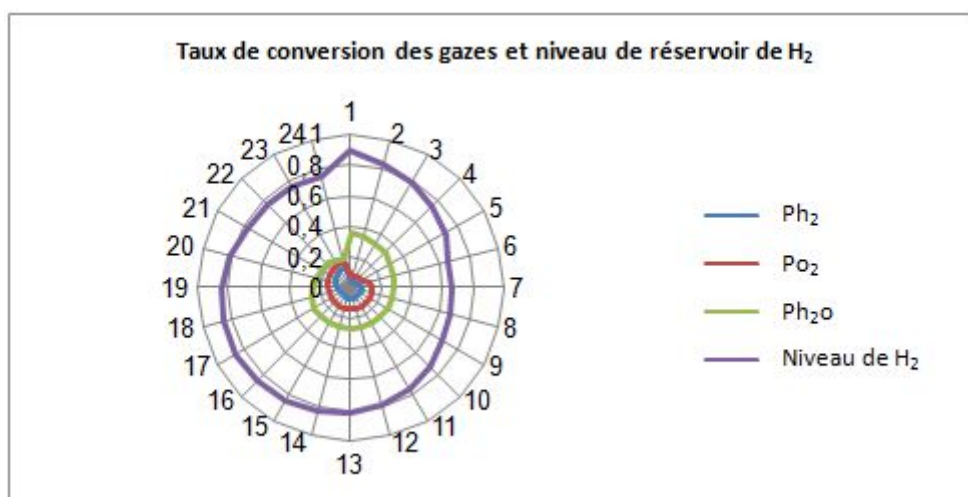


Figure. 3.12 : Taux de conversion des gaz et niveau de réservoir du H₂.

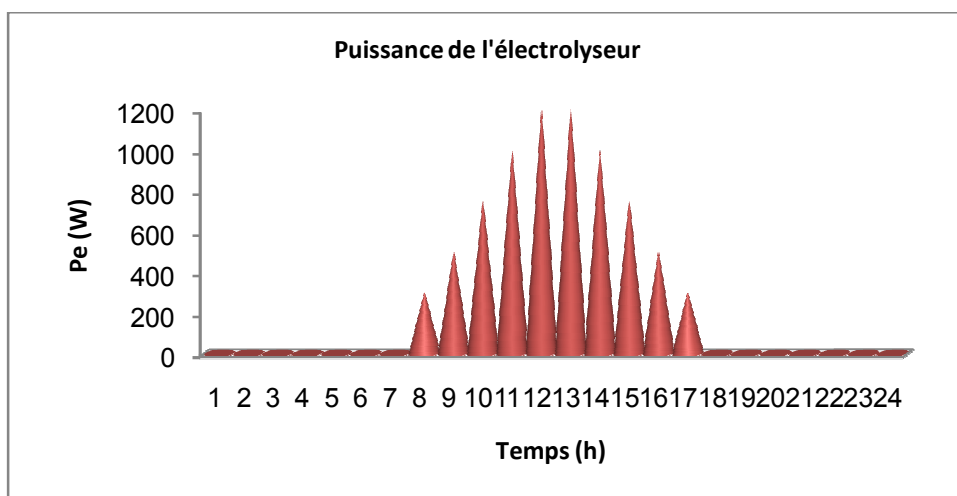


Figure. 3.13 : Puissance de l'électrolyseur.

➤ Scénario 2 : 23/12/2016

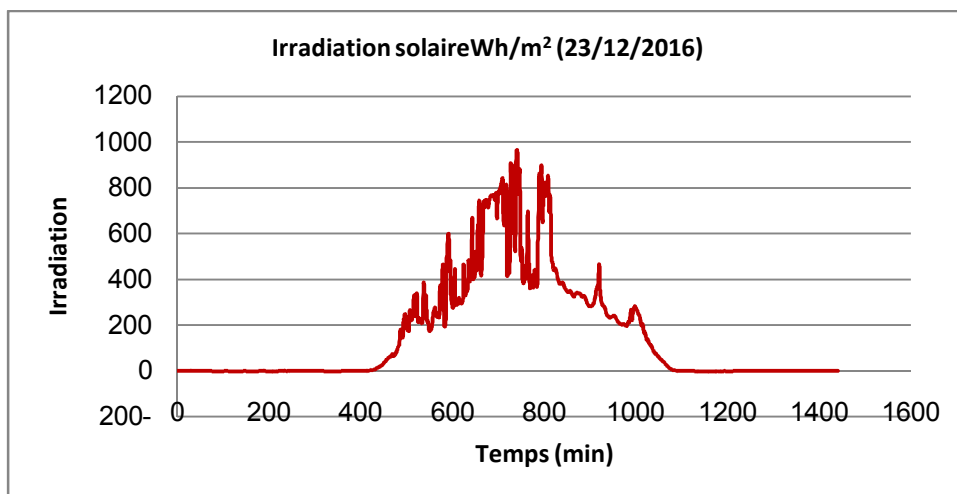


Figure. 3.14 : Profil de l'irradiation solaire (23/12/2016) région de Bouzeria.

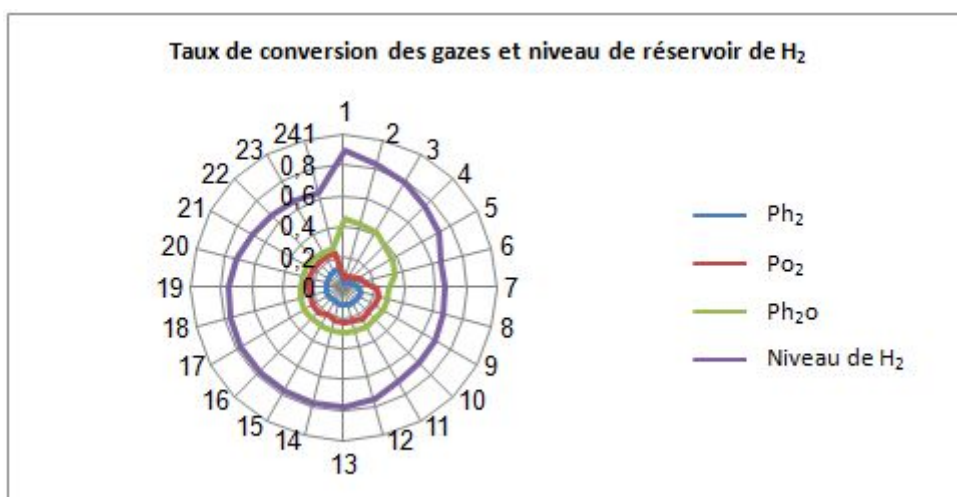


Figure. 3.15 : Taux de conversion des gaz et niveau de réservoir du H₂.

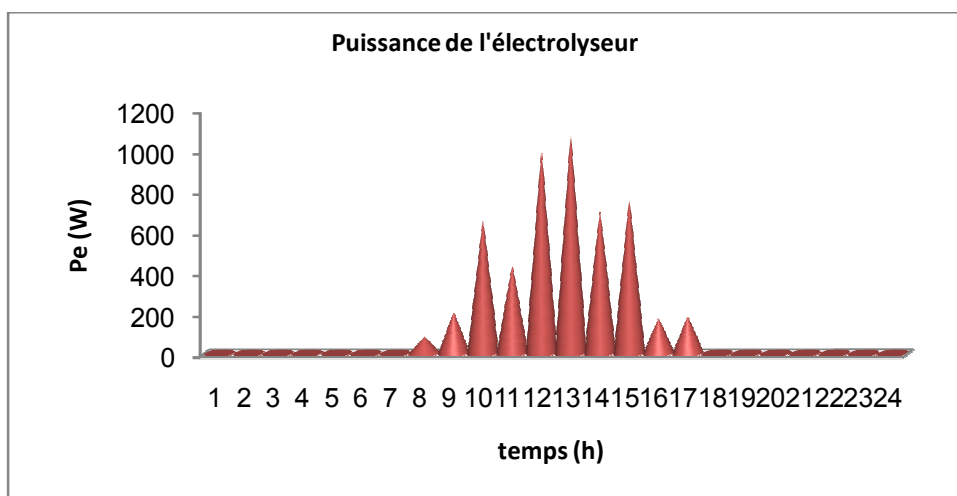


Figure. 3.16 : Puissance de l'électrolyseur.

➤ Scénario 3 : 07/02/2017

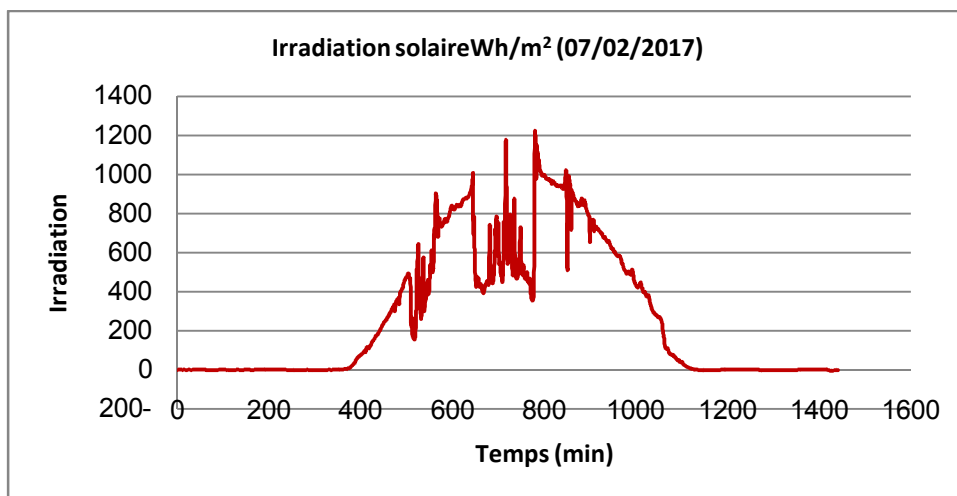


Figure. 3.17 : Profil de l'irradiation solaire (07/02/2017) région de Bouzeria.

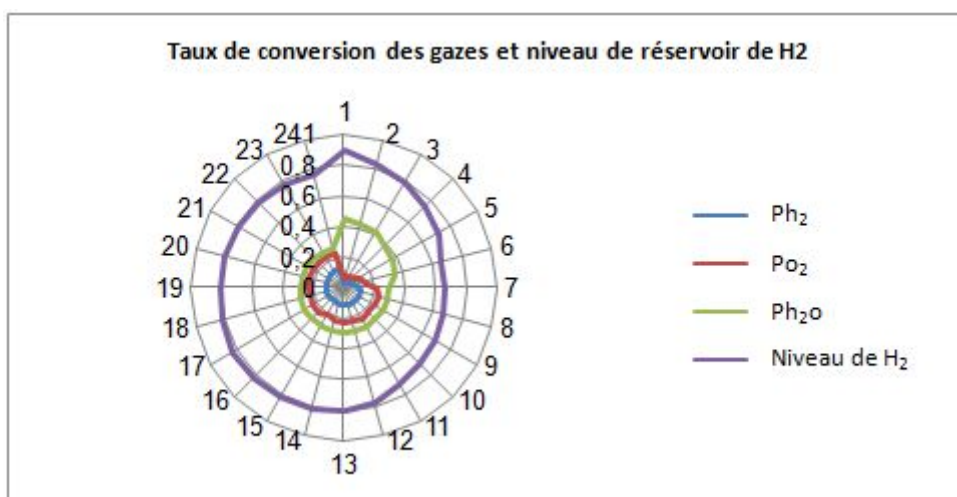


Figure. 3.18 : Taux de conversion des gaz et niveau de réservoir du H₂.

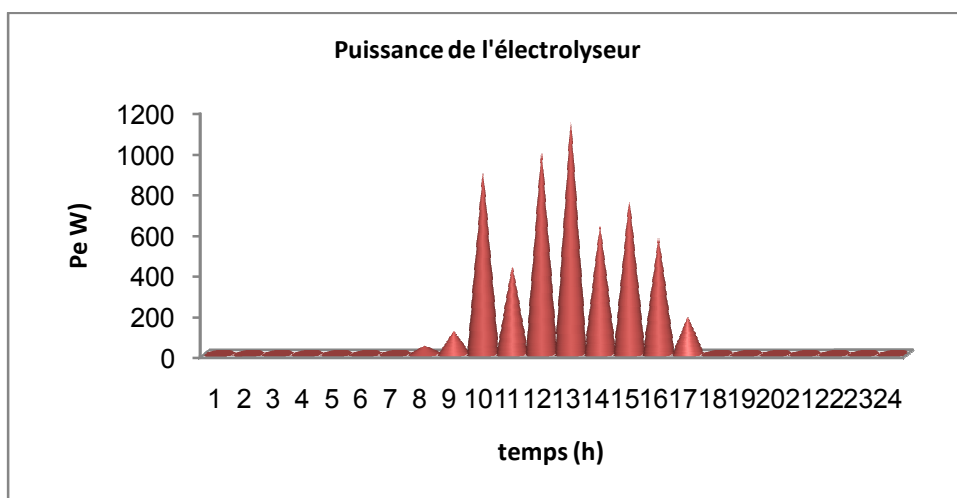


Figure. 3.19 : Puissance de l'électrolyseur.

➤ Scénario 4: 17/04/2017

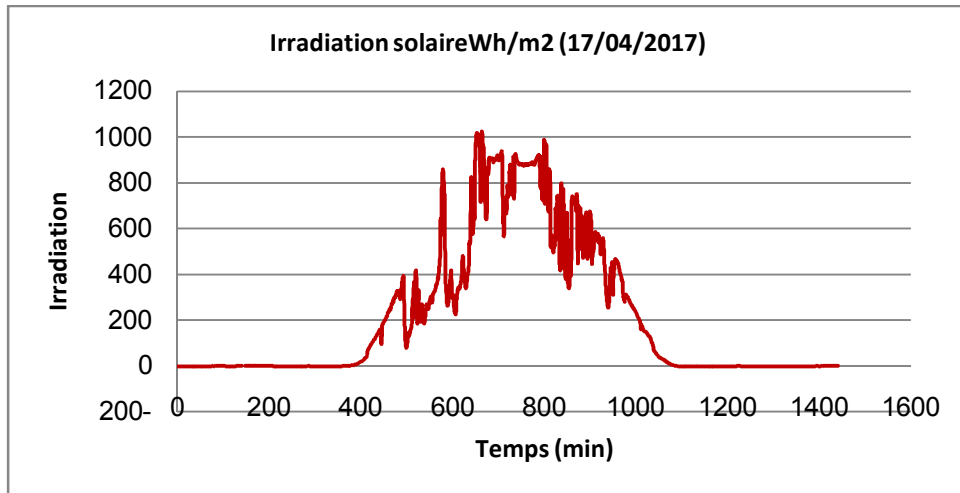


Figure. 3.20 : Profil de l'irradiation solaire (17/04/2017) région de Bouzeria.

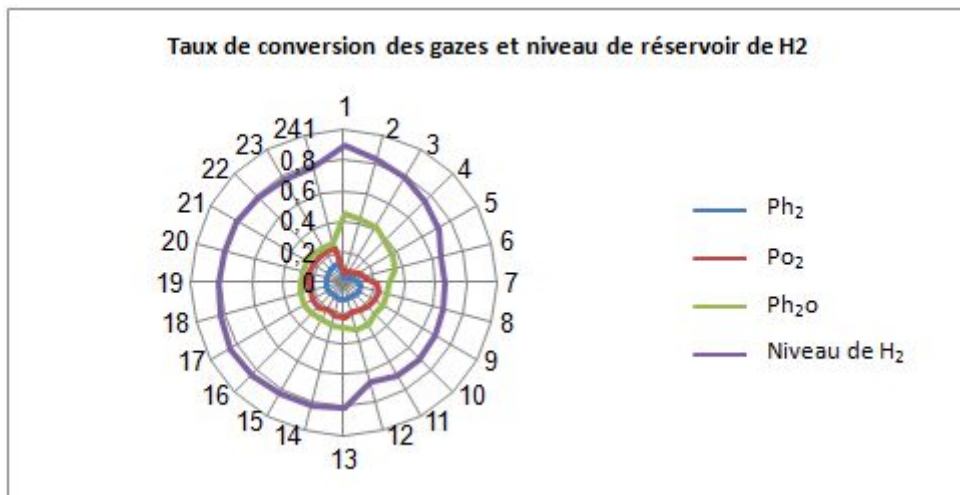


Figure. 3.21 : Taux de conversion des gaz et niveau de réservoir du H₂.

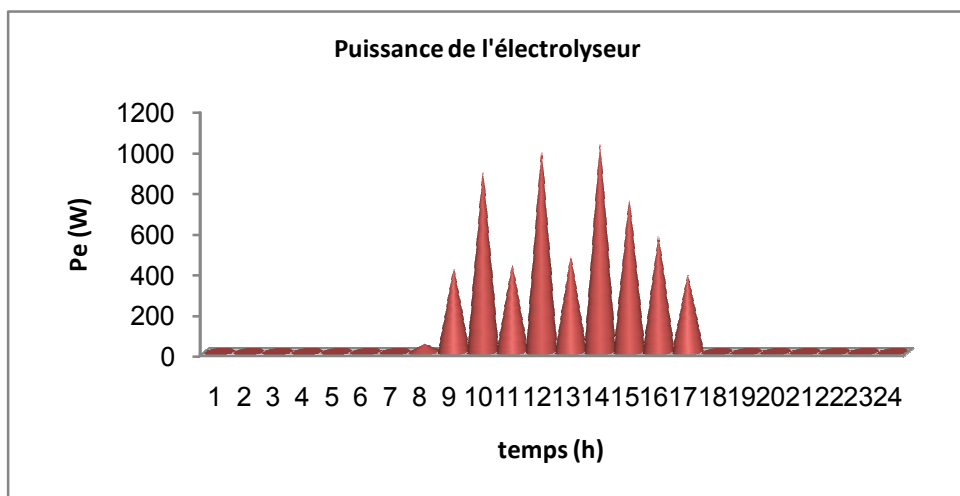


Figure. 3.22 : Puissance de l'électrolyseur.

3.4. Raccordement au réseau de la chaîne de PV/H₂ en utilisant la technique de commande par mode glissant [15]

Dans les sources d'alimentation électrique en mode interconnexion au réseau, il est cherché toujours à assurer de bonnes performances à faible coût. Généralement la maximisation des puissances injectées par les sources, la qualité de l'énergie, la forme des signaux électriques, le contrôle du flux de puissance, et la compensation de puissance réactive sont les paramètres les plus importants dans lesquels on cherche à réguler avec meilleures performances. De plus, la simplicité de l'algorithme de contrôle est très importante. Pour le choix de l'algorithme, il est important et nécessaire de rechercher la topologie appropriée afin d'optimiser le coût global de l'installation des systèmes électriques.

Le système étudié dans ce travail représenté par la figure. 3.23. Il composé d'un générateur PV et d'un générateur à fuel hydrogène connectés au réseau via la stratégie SMC utilisant un onduleur unipolaire triphasé contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion vectorielle (SVPWM). Un transformateur est placé entre l'onduleur DC-AC et le réseau électrique. L'onduleur de puissance lié a un circuit de découplage et un ensemble d'inductance de filtre. Le filtre utilisé pour filtrer les harmoniques de commutation. Le circuit de découplage utilisé pour assurer le contrôle de l'onduleur. Le système composé de deux sources, photovoltaïque et pile à combustible à hydrogène. La puissance générée par le générateur PV répond aux charges de l'utilisateur et le surplus utilisé pour l'électrolyse de l'eau par un électrolyseur afin de produire de H₂ où il est stocké dans le réservoir de gaz pour l'utilisé pour produire une puissance en cas de besoin de la côte demande.

Le système de contrôle est composé de deux principaux circuits de commande, le côté contrôle de la génération d'énergie et le côté contrôle de réseau. Le côté contrôle du système d'alimentation assure environ deux fonctions:

- La méthode Perturbation & Observation (P&O) MPPT appliquée au système photovoltaïque pour assurer la production maximale de la puissance;
- Une boucle simple de contrôle en cascade du système de production hydrogène fonctionnant à puissance maximale et contrôlant la tension continue.

Dans cette étude, le contrôle principal est le mode glissant. Cette stratégie est relativement simple dont la stabilité est toujours vérifiée selon les critères de Lyapunov.

Le mode glissant développé et appliqué côté réseau pour atteindre de nombreux objectifs comme : assurer un découplage de contrôle de la puissance active (P) et réactive (Q), compensant Q, et pour contrôler la stabilité de la tension du réseau. Aussi, maintenir le courant en phase avec la tension du réseau.

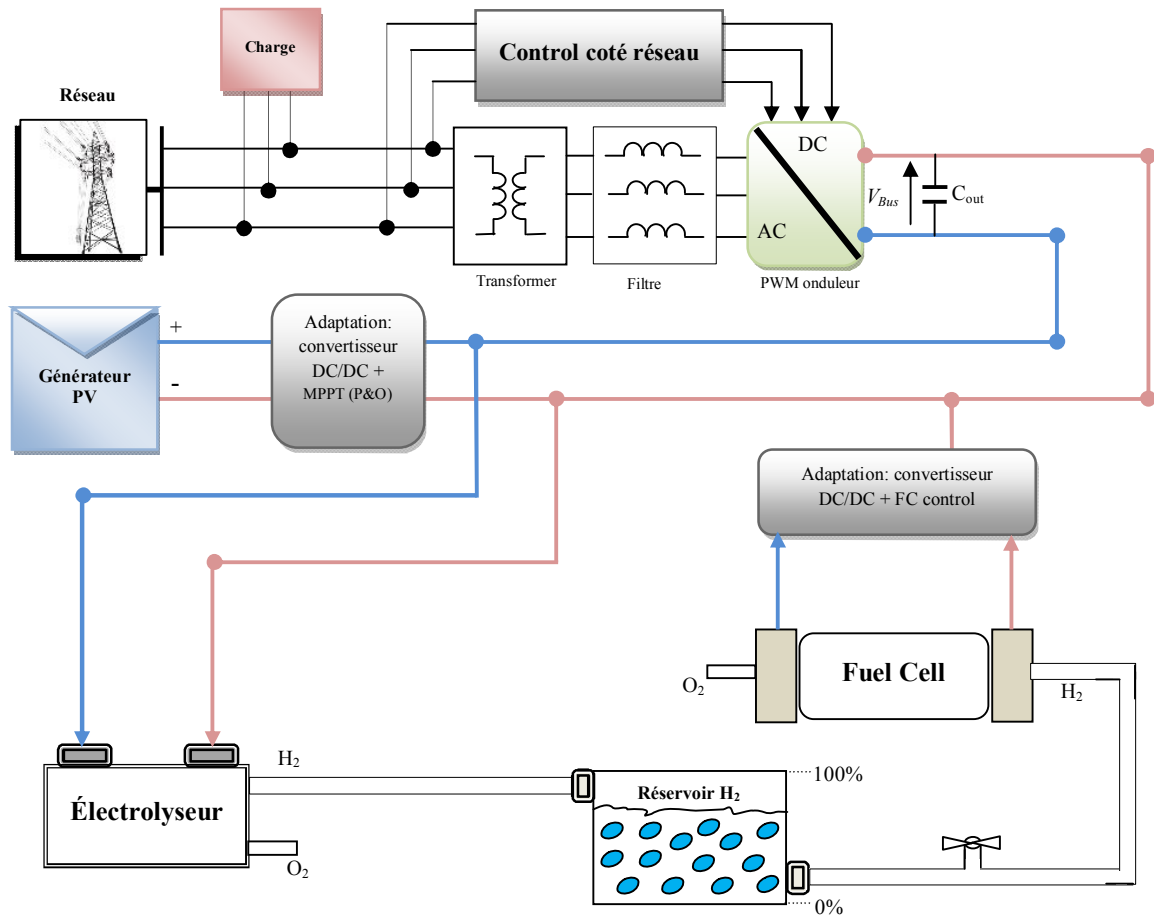


Figure. 3.23 : Configuration du système hybride PV-FC connecté au réseau.

3.4.1. Contrôle côté génération de la puissance

3.4.1.1. Contrôle côté système de production photovoltaïque

Le système présenté par la figure. 3.24 est le système de production photovoltaïque composé d'un générateur PV et d'un convertisseur élévateur DC-DC commandé par un MPPT pour assurer la puissance maximale produite. Dans ce travail, l'algorithme de commande MPPT de type P&O est utilisé.

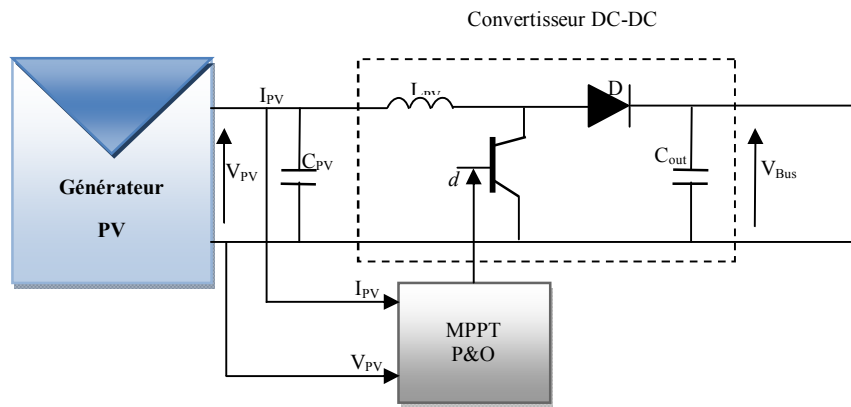


Figure. 3.24 : Contrôle côté production photovoltaïque.

3.4.1.2. Contrôle côté système de production hydrogène

Le contrôle coté système de production hydrogène est illustrée par la figure. 3.25. Il est basé sur un convertisseur élévateur DC-DC fonctionnant avec une boucle de contrôle en cascade pour assurer une puissance maximale. Le but de la commande est d'assurer la puissance maximale générée par FC et aussi, de contrôler la tension continue afin d'obtenir la valeur constante désirée de la tension du Bus continu V_{Bus} .

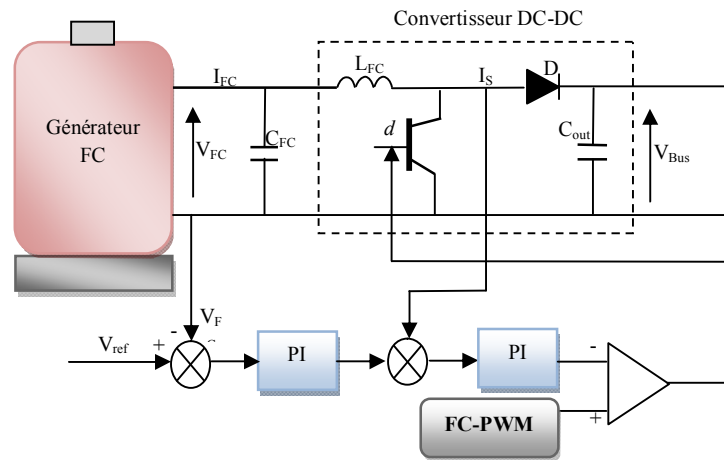


Figure. 3.25 : Contrôle côté production hydrogène.

3.4.2. Contrôle côté réseau

Le contrôle de puissance proposé du réseau est le mode glissant (SMC). C'est le contrôle principal dans le système qui a été développé et appliqué pour obtenir les meilleurs performances considérant le contrôle transitoire en considérant l'exigence de la stabilité. Un objectif important souhaité de tout contrôle d'un onduleur dans l'application du système d'alimentation connecté au réseau est de maintenir le courant de sortie en phase avec la tension de service. Ainsi, pour obtenir un facteur de puissance

(FP) plus élevé qui satisfait la demande de FP dans les applications industrielles. Il convient de garantir un angle de phase minimal (ζ) entre le courant et la tension. La figure. 3.26 a montre un courant non en phase avec la tension ($\zeta \neq 0$), dans ce cas il n'y a pas de synchronisme. Cependant, la figure. 3.26 b montre le courant en phase avec la tension ($\zeta=0$) en conséquence, un synchronisme entre le courant et la tension et un FP plus proche de 1.

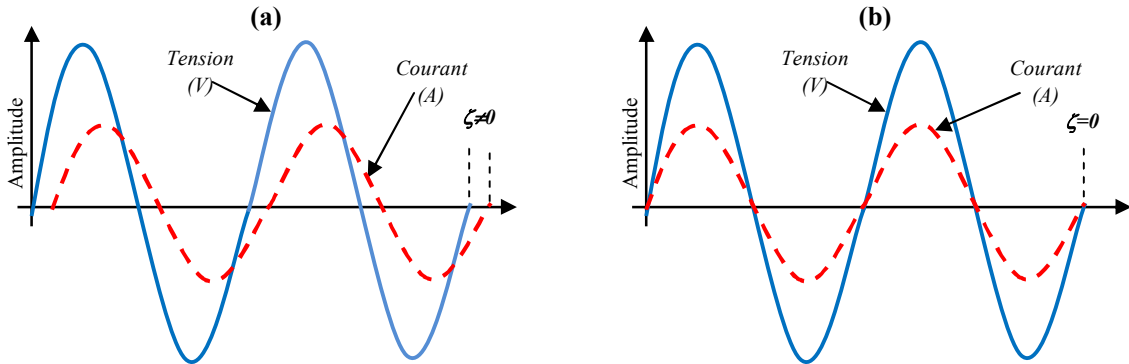


Figure. 3.26 : (a): tension non en phase avec le courant; (b): tension en phase avec le courant.

Dans ce travail, la technique de commande SMC développée pour assurer de bonnes performances de contrôle du système hybride PV-FC connecté au réseau. L'objectif est d'archiver un angle de phase tension/courant optimal et de maintenir Q nulle dans toutes conditions d'utilisation. Il comprend que les SMC ont de hautes performances de contrôle. Ce type de contrôle est non linéaire, et il est classé comme un système de structure variable (VSS). Les principes de la loi de la commande SMC et de leur application sont les suivants.

Car le vecteur de surface a la même dimension que le contrôle vectoriel (U):

$$\dot{\sigma} = A(\sigma, t) + B(\sigma, t)U \quad 3.22$$

Dans la littérature, il peut avoir différentes formes de surface de glissement (SS). En général, nous choisissons une surface non linéaire. La forme non linéaire est une fonction de l'erreur sur la (les) variable (s) contrôlée (σ) donnée par:

$$S(\sigma) = \left(\frac{d}{dt} + \gamma_{\sigma} \right)^{r-1} e(\sigma) \quad 3.23$$

où, $e(\sigma)$: la différence entre la variable contrôlée et sa référence; γ_{σ} : une constante positive; r : le nombre de fois pour dériver la surface pour obtenir le contrôle; S : la variable contrôlée.

L'objectif principal du contrôle proposé au réseau est de maintenir la surface à zéro. Les conditions d'invariance et les critères de convergence ont des dynamiques différentes qui permettent au système de converger vers la surface et de s'y maintenir quelle que soit la perturbation donnée par:

$$\begin{cases} \dot{S}(\sigma) \geq 0 & \text{Si } S(\sigma) \leq 0 \\ \dot{S}(\sigma) < 0 & \text{Si } S(\sigma) > 0 \end{cases} \quad 3.24$$

La loi de Lyapunov est appliquée pour assurer la stabilité du système. L'idée est de choisir une fonction pour assurer l'attraction du variable à contrôler à sa valeur de référence. La fonction de Lyapunov est définie comme suit:

$$V(\sigma) = \frac{1}{2} S^2(\sigma) \quad 3.25$$

La dérivée de cette fonction est:

$$\dot{V}(\sigma) = S(\sigma) \cdot \dot{S}(\sigma) \quad 3.26$$

La structure de contrôle est composée de deux parties:

- La linéarisation exacte U_{eq} est la variable de contrôle que l'inclinaison sert à maintenir le contrôle sur la surface glissante SS.
- La stabilisation U_n est le contrôle discret disposé pour vérifier la convergence de condition.

La loi générale donnée comme suit :

$$U = U_{eq} + U_n \quad 3.27$$

Il est nécessaire de trouver une expression du contrôle de surface. C'est fait comme:

$$\dot{S}(\sigma) = \frac{dS}{dt} = \frac{dS}{d\sigma} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad 3.28$$

En remplaçant (3.23) et (3.27) par (3.28), la dérivée de base est:

$$\dot{S}(\sigma) = \frac{dS}{dt} (A(\sigma, t) + B(\sigma, t)U_{eq}) + \frac{dS}{d\sigma} \cdot B(\sigma, t)U_n \quad 3.29$$

Nous en déduisons l'expression d' U_{eq} , c'est comme:

$$U_{eq} = - \left(\frac{dS}{dt} \cdot (B(\sigma, t)) \right)^{-1} \cdot \frac{dS}{dt} \cdot A(\sigma, t) \quad 3.30$$

La forme la plus simple qui peut obtenir U_n est la suivante :

$$U_n = K \cdot \text{sign}(S(\sigma, t)) \quad 3.31$$

Où, le *sign* de K doit être différent de $\frac{dS}{d\sigma} \cdot B(\sigma, t)$

Le système proposé peut être caractérisé en tant que topologie à variation de temps, l'action de contrôle est discontinue. L'une des principales caractéristiques du SMC est son insensibilité aux paramètres du système une fois qu'il atteint SS. Les besoins opérationnels de contrôle de l'onduleur est de déterminer la trajectoire de référence sur laquelle l'état du système va glisser. Les exigences de fonctionnement énoncées dans la section précédente peuvent être écrites sous la forme d'écart de courant e_d et e_q , dans le référence de rotation d, q comme suit:

$$\begin{cases} e_d = i_{gd}^{ref} - i_{gd} \\ e_q = i_{gq}^{ref} - i_{gq} \end{cases} \quad 3.32$$

Où : i_{gq}^{ref} égal à zéro et représente le point de départ de la sélection de commutation conçue dans la boucle interne du système de commande et i_{gd}^{ref} doit être sélectionné afin de s'assurer que la tension du convertisseur maintenue sur sa valeur de référence.

Le fonctionnement du système doit être tel quel afin de fournir les $e_d=0$ et $e_q=0$ malgré le changement du courant de charge et les variations du module de la tension d'alimentation. Les exigences (3.32) peuvent être satisfaites si les fonctions de Lyapunov (3.25) ont des dérivées à temps défini négatives (3.26). Cela peut être réalisé si : $e_d \cdot \dot{e}_d < 0 \mid e_q \cdot \dot{e}_q < 0$. Enfin, les conditions ci-dessus sont remplies si les commandes u_d et u_q satisfont aux conditions suivantes:

$$\begin{cases} \text{sign}(u_d - u_{dav}) = \text{sign}(e_d) \\ \text{sign}(u_q - u_{qav}) = \text{sign}(e_q) \end{cases} \quad 3.33$$

Où,

$$\begin{cases} u_{dav} = \frac{\left(L \frac{di_d^{ref}}{dt} + \sqrt{3} \cdot V_{Bus} - L\omega i_q \right)}{V_{Bus}} \\ u_{qav} = \frac{\left(L \frac{di_q^{ref}}{dt} - L\omega i_d \right)}{V_{Bus}} \end{cases} \quad 3.34$$

pires à combustible dans chaque module 65 cellules. Tous les FC sont capables de générer 10000W à la puissance maximale. Le système d'alimentation intègre avec réseau électrique leur inductance $L=0.15\text{mH}$ avec une résistance de 0.01Ω . Pour faire de la tension de sortie de l'onduleur une forme sinusoïdale pure, un filtre L est utilisé. La valeur numérique de l'inductance de filtre L_f est de 20mH.

Pour tester et analyser les performances du modèle, une simulation a été approuvée, en utilisant le logiciel MATLAB, pendant 2.4 secondes, ce qui est similaire à 24 heures d'un jour estival.

La simulation effectuée afin de tester les comportements du système de commande proposés. Dans lequel les principaux objectifs sont de vérifier: la régulation de la tension du bus continu face au changement d'état du système de production d'énergie et à la variation côté demande; Capacités du système FC de production/injection et le stockage de l'hydrogène; tension de sortie de l'onduleur et qualité du courant du réseau; la capacité de la conception SMC à fournir un contrôle indépendant de P et Q avec la possibilité de la compensation de puissance réactive. Dans notre cas, la charge électrique considérée comme une puissance apparente (S) contrôlable composée de puissances active et réactive ($S^2 = P^2+Q^2$). Une référence variable de P est injectée dans le réseau comme charge pour différentes conditions de génération (moyenne, grande et petite) où, Q maintenu constant égal à zéro afin de tester le potentiel de contrôle face à la compensation de puissance réactive. Le test de simulation montre les résultats suivants :

- La figure. 3.28 illustre la tension du bus continu avec une bonne réponse dynamique qui est continue et approximativement constante. Il y a deux petits pics aux temps de $t=0,8$ et $t=1,6$ seconde, en raison des variations du profil de P.
- La figure. 3.29 montre la tension de sortie du convertisseur DC-AC, (a) la tension d'une phase avant le filtrage et (b) la tension de trois phases après le filtrage. La tension avant le filtrage a deux niveaux. Il contient une tension positive en semi-cycle négatif et une tension négative en semi-cycle positif causée par un retard de certaines impulsions de réception du convertisseur qui fournissent une valeur moyenne de la tension de sortie différente de zéro. Après filtrage, la tension de sortie de l'onduleur montre une forme sinusoïdale périodique de bonne qualité.

- Les différentes puissances du système sont données par la figure. 3.30: (a) Puissance active, (b) puissance réactive et (c) puissances de PV et de FC. D'après (a) et (b), nous pouvons voir que P et Q suivent leurs références avec une réponse dynamique élevée. De plus, Q est proche de zéro avec de très faibles pics à des instants de variation de profil P qui prouvent que le contrôle SMC est capable d'assurer un contrôle indépendant de P et Q avec une bonne compensation de la puissance réactive. Les sources PV et FC sont capables d'assurer la complémentarité de l'injection de la puissance au réseau en fonction de la production PV et de la variation de la demande. Où, PV présenté comme source primaire. Ainsi, ce mode de fonctionnement du système de génération permet de résoudre les problèmes de variabilité et d'intermittence de la source photovoltaïque.
- Le niveau du réservoir d'hydrogène est représenté sur la figure. 3.31 qui prouve la possibilité du stockage de l'hydrogène lorsqu'il existe une puissance PV excédentaire et peut être utilisé comme source supplémentaire.
- La figure. 3.32 montre que le courant de ligne est presque en phase avec la tension du réseau pendant toute la durée de la simulation. Dans lequel, de nombreux zooms prouvent que le contrôle des puissances active et réactive est indépendant où la puissance active est la figure du courant de ligne.
- On voit également sur la figure. 3.33 que l'angle de phase entre la tension et le courant proche de zéro. Ainsi, il conclut que le système proposé basé sur le contrôle par le mode glissant souvent offre des performances élevées de découplage P-Q et de compensation de la puissance réactive.

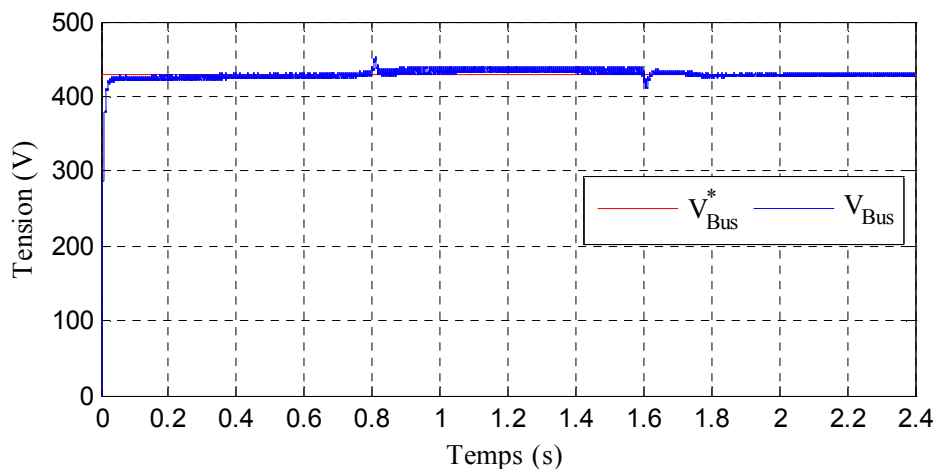


Figure. 3.28 : Tension de bus continu.

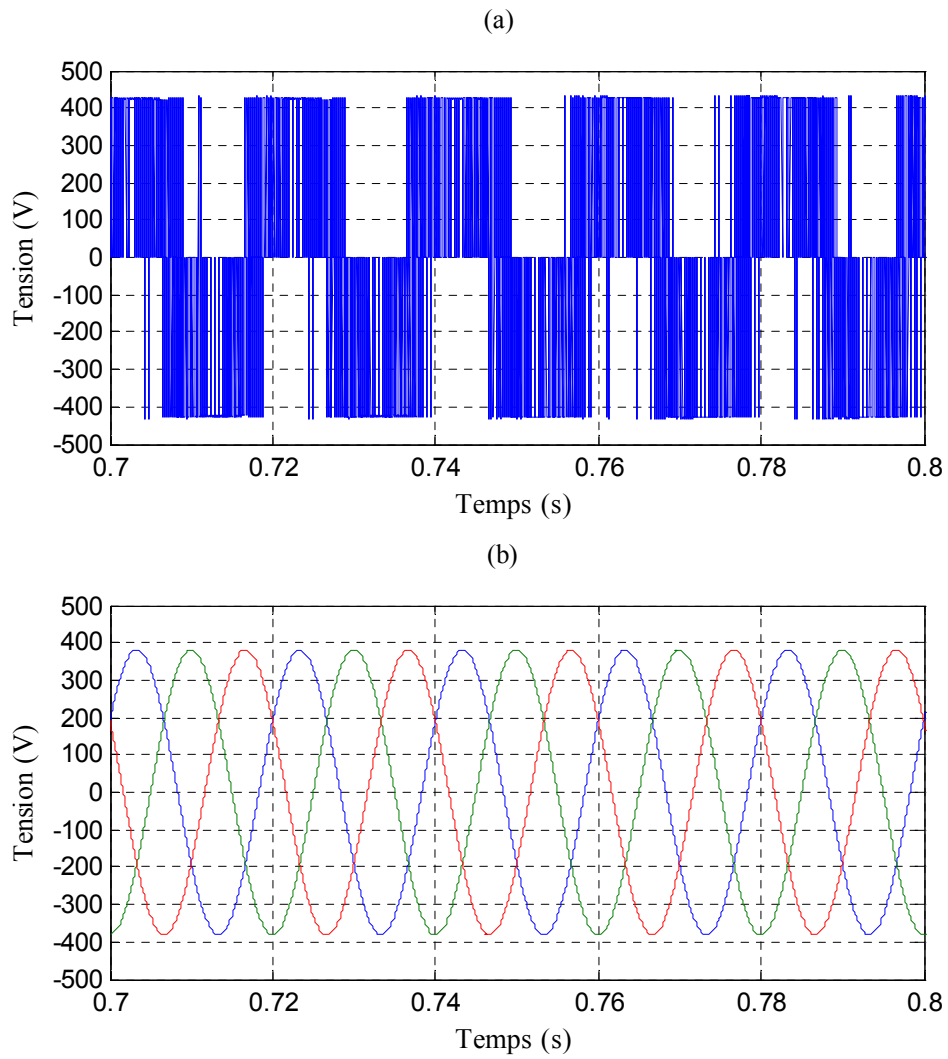
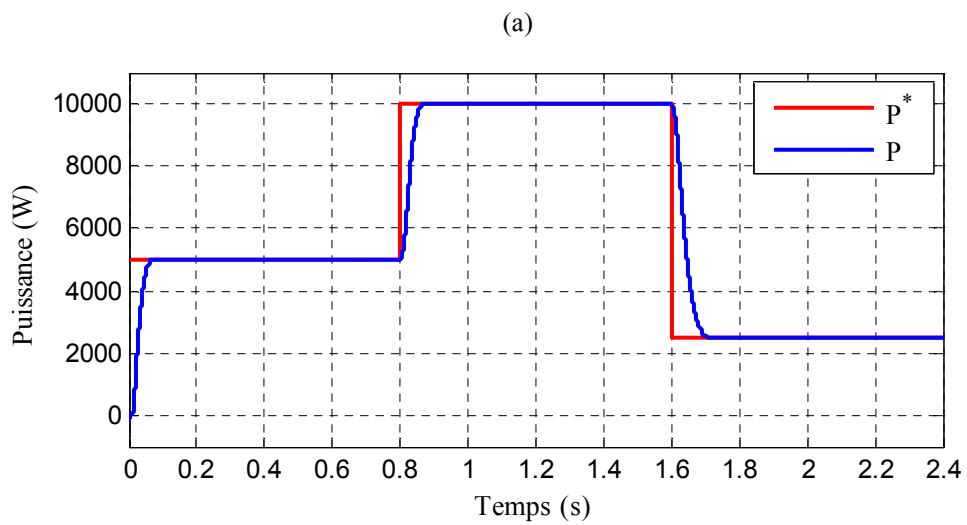


Figure. 3.29 : tension a la sortie de l'onduleur: (a) Zoom avant filtrage; (b) Zoom après filtrage.



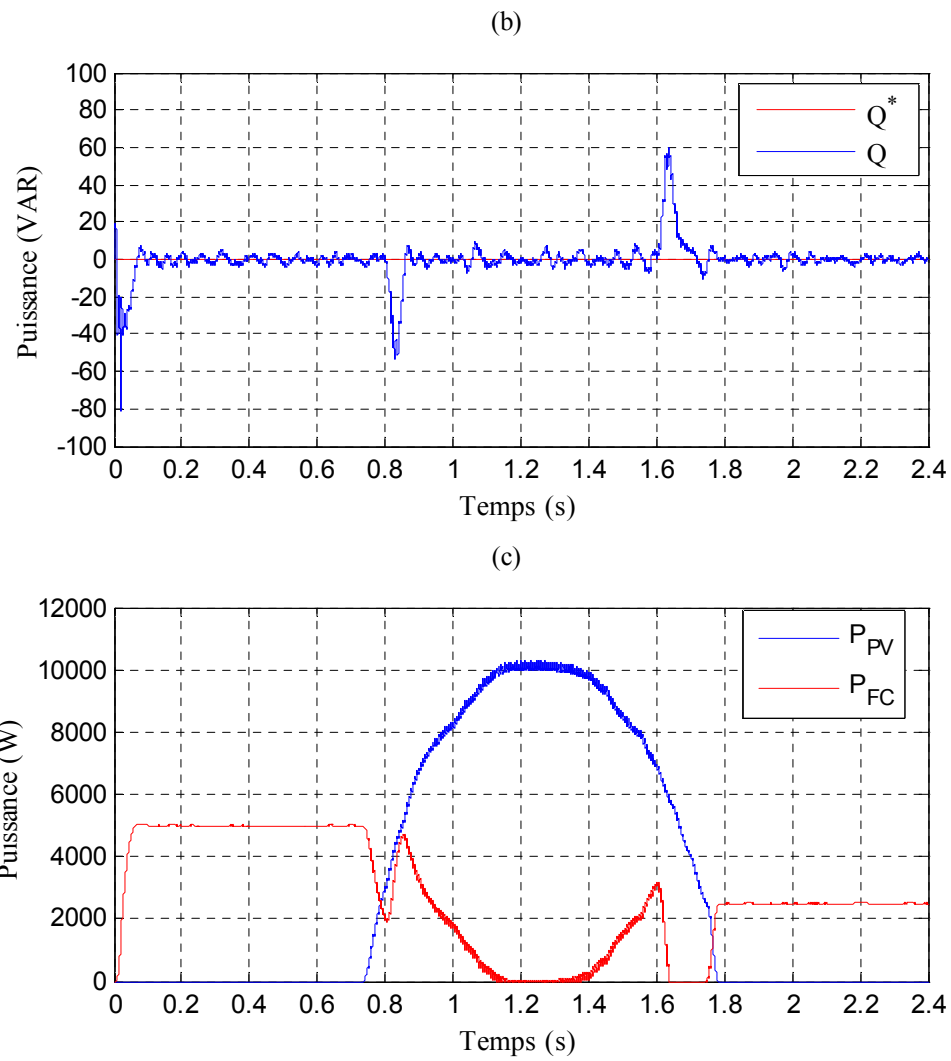


Figure. 3.30 : Puissances du système: (a) active; (b) réactive; (c) Puissance P_{PV} et P_{FC} .

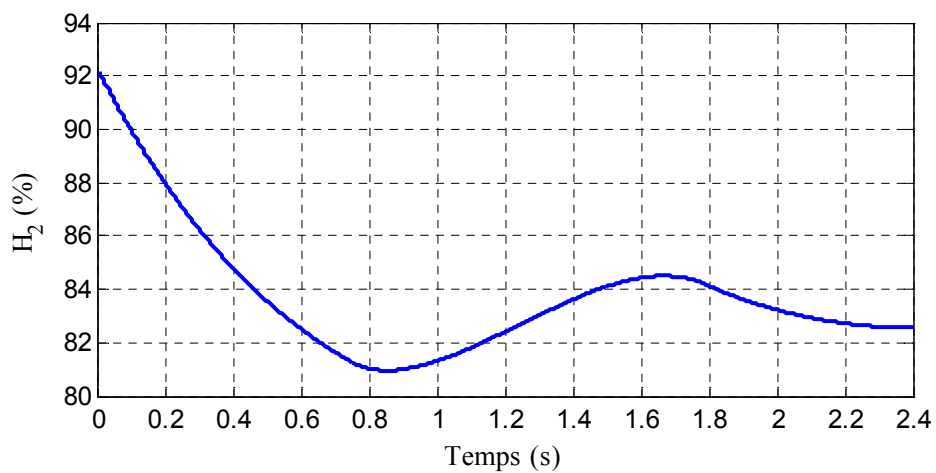


Figure. 3.31 : Niveau de H_2 dans le réservoir.

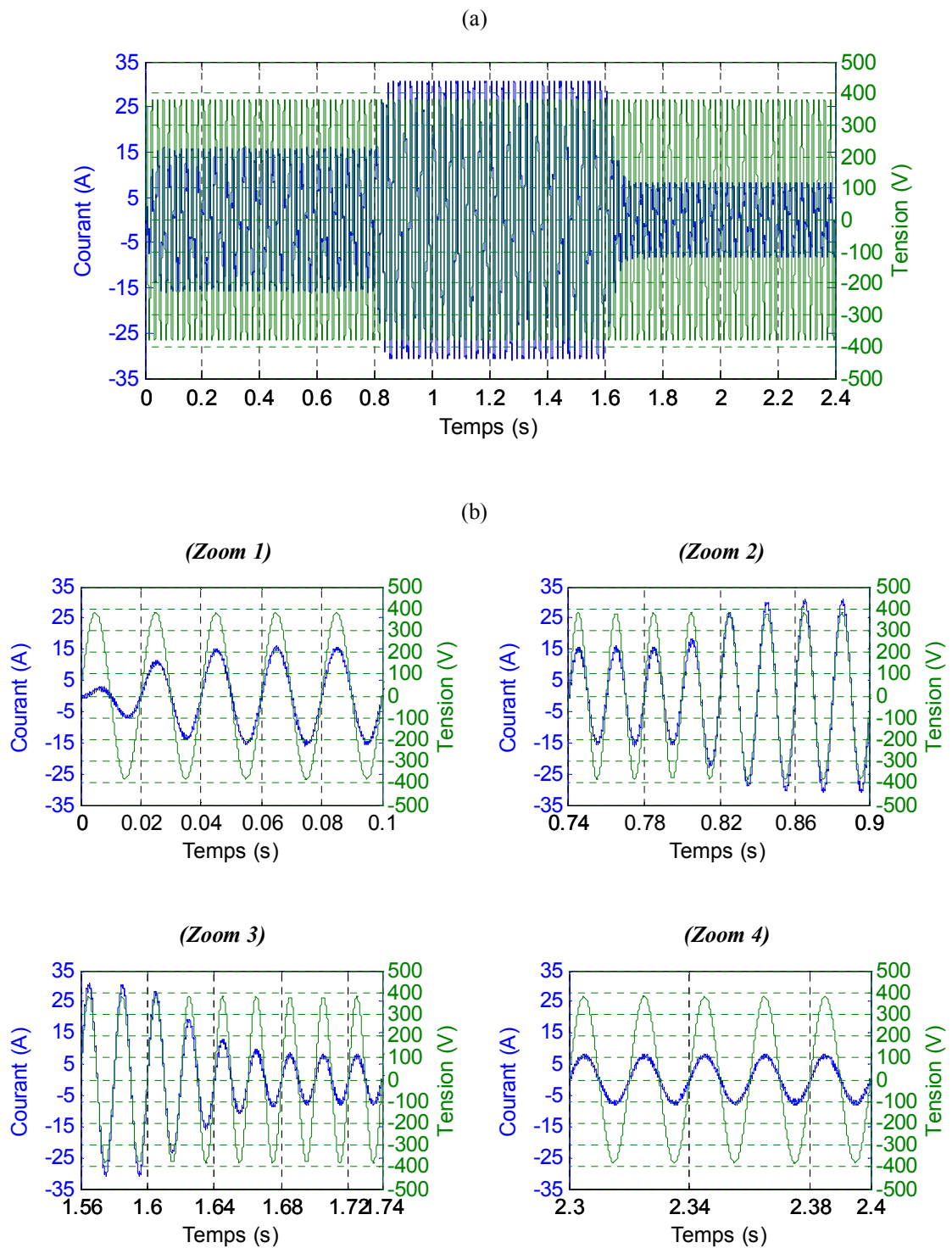


Figure. 3.32 : (a) Courant et tension de ligne; (b) Différents zooms de courant et de tension de ligne.

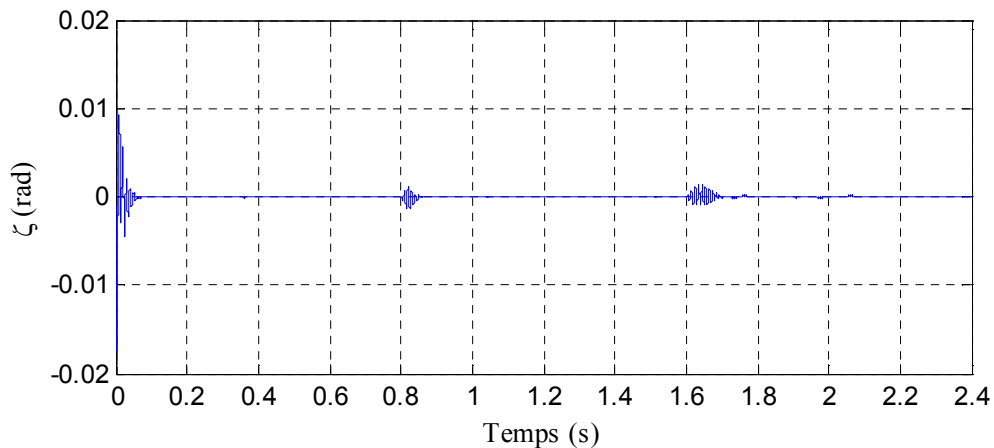


Figure. 3.33 : Angle de phase ‘ ζ ’ entre le courant et la tension de ligne.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, le stockage indirect utilisant le potentiel de l’hydrogène comme vecteur d’énergie est utilisé afin de renforcer une chaîne de production renouvelable celle de photovoltaïque. En outre, cette étude a permis de développer et d’appliquer avec succès des stratégies de contrôle simples et efficaces pour un système hybride PV-FC connecté au réseau. Le système de génération permet de maximiser l’utilisation de la puissance PV et d’optimiser l’utilisation de la puissance FC afin de maximiser la production et le stockage de H_2 . La contribution principale du travail a été apparue avec la conception du contrôle de mode glissant. La technique SMC est reconnue avec sa simplicité de topologie et ses hautes performances. Cette théorie a été développée et appliquée pour satisfaire toutes les recommandations des comportements de contrôle des systèmes de production d’électricité connectés au réseau. Les résultats prouvent que le système permet d’assurer une haute qualité de contrôle P-Q avec un bon découplage, satisfaisant de la compensation de puissance réactive par ailleurs, un excellent facteur de puissance. Le chapitre qui suit intéresse au système smart et de la gestion des puissances pour système multi sources avec stockage de l’énergie.

3.6. Bibliographie

- [1] Lajnef, Tourkia, Slim Abid, and Anis Ammous. "Modeling, control, and simulation of a solar hydrogen/fuel cell hybrid energy system for grid-connected applications." *Advances in Power Electronics 2013* (2013).
- [2] Lachaize, Jérôme. *Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction*. Diss. 2004.
- [3] Thounthong, P., S. Raël, and B. Davat. "Conception et réalisation d'un convertisseur statique basse tension pour pile à combustible de type PEM." *Proc. Électronique de Puissance du Futur 2004 (EPF04)*.
- [4] Thounthong, Phatiphat. *Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs*. Diss. Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2005.
- [5] Boehm, Hans P. "Chemical identification of surface groups." *Advances in catalysis*. Vol. 16. Academic Press, 1966. 179-274.
- [6] Amphlett, John C., et al. "Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell I. Mechanistic model development." *Journal of the Electrochemical Society* 142.1 (1995): 1-8.
- [7] Djafour, Ahmed. *Etude d'un système de production d'hydrogène solaire*. Diss. Thèse de Doctorat, Université d'Ouargla, 2013.
- [8] Rozain, Caroline. *Développement de Nouveaux Matériaux d'Electrodes pour la Production d'Hydrogène par Electrolyse de l'Eau*. Diss. Paris 11, 2013.
- [9] Chang, W. R., et al. "Effect of clamping pressure on the performance of a PEM fuel cell." *Journal of Power Sources* 166.1 (2007): 149-154.
- [10] Hwang, J. J. "Thermal-electrochemical modeling of a proton exchange membrane fuel cell." *Journal of the Electrochemical Society* 153.2 (2006): A216-A224.
- [11] Carmo, Marcelo, et al. "A comprehensive review on PEM water electrolysis." *International journal of hydrogen energy* 38.12 (2013): 4901-4934.
- [12] Labbé, Julien. *L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés*. Diss. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [13] Stolten, Detlef, ed. *Hydrogen and fuel cells: fundamentals, technologies and applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [14] Hoogers, Gregor, ed. *Fuel cell technology handbook*. CRC press, 2002.
- [15] Abadlia, Issam, Mohamed Adjabi, and Hamza Bouzeria. "Sliding mode based power control of grid-connected photovoltaic-hydrogen hybrid system." *International Journal of Hydrogen Energy* (2017).

*Chapitre 4 : Systèmes smart et gestion de l'énergie***4.1. Introduction**

Pour garantir l'alimentation en énergie avec une fiabilité de service requise chaque fois que cela est économique, écologique et économisant les ressources, les services publics doivent programmer l'allocation d'énergie pour le lendemain. En plus des prévisions de la demande, cette planification est basée sur des prévisions de l'approvisionnement non-programmable par des usines distribuées utilisant des ressources énergétiques renouvelables. Bien que cette partie soit difficile à prédire, les énergies renouvelables gagnent en importance en raison des orientations politiques et des tendances sociales. Cette tâche de prédiction est compliquée par le fait que sur les marchés déréglementés, le système doit répondre rapidement et à moindre coût aux variations de la demande de charge.

Les smart grids qui sont des réseaux de distribution d'électricité dits «intelligents» grâce à des technologies informatiques et de communication combinées de manière à optimiser la production, la distribution, la consommation. Un smart grid vise à mieux mettre en relation l'offre et la demande entre les producteurs et les consommateurs d'électricité. Les SGs peuvent être définis selon quatre caractéristiques en matière de :

- flexibilité : ils permettent de gérer plus finement l'équilibre entre production et consommation ;
- fiabilité : ils améliorent l'efficacité et la sécurité des réseaux ;
- accessibilité : ils favorisent l'intégration des sources d'énergies renouvelables sur l'ensemble du réseau ;
- économie : ils apportent, grâce à une meilleure gestion du système, des économies d'énergie et une diminution des coûts (à la production comme à la consommation).

Ce chapitre expose les réseaux intelligents en tant que technologie moderne présente une solution sophistiqué face aux problèmes de service énergétiques de demande et de l'offre. En outre, une exploitation intéressante d'une technique pour la gestion de puissance dans un MG en utilisant la modélisation et l'optimisation par un algorithme d'évolution différentielle chaotique basé sur l'apprentissage multi-cross.

4.2. Le micro grid

4.2.1. Définition

Le concept de Microgrid fait référence à un groupe de charges et de générations distribuées qui fonctionnent comme une entité contrôlable fournissant de l'énergie électrique à sa région la plus proche. Le micro grid a été mis en œuvre pour résoudre le problème d'interconnexion de DG distinctes dans différents systèmes d'alimentation. Les systèmes DG utilisent généralement des sources d'énergie renouvelables comme la biomasse, le biogaz, le solaire, le vent, etc., jouent de plus en plus un rôle essentiel dans le système de distribution d'énergie électrique [1]. Les systèmes DG sont décentralisés et situés à proximité de la charge. Un exemple de structure de microgrid est représenté sur la figure. 4.1.

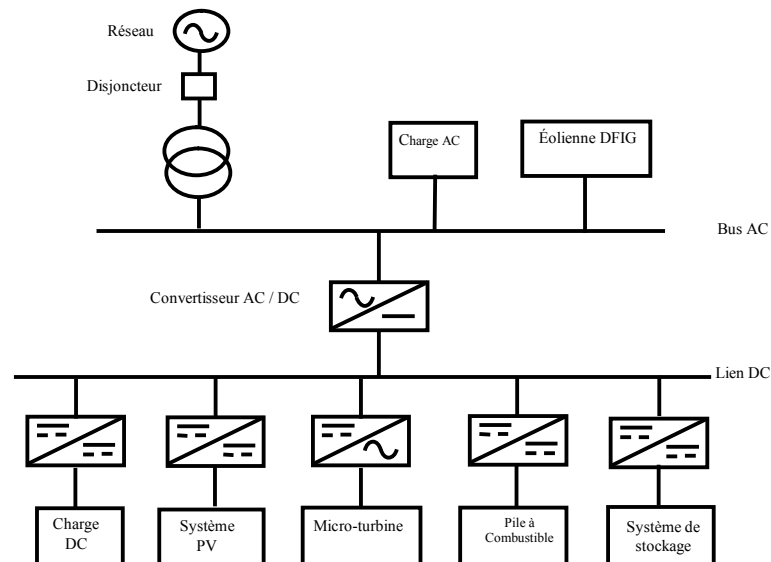


Figure. 4.1 : Structure d'un microgrid.

Le micro grid fonctionne dans deux environnements d'exploitation [2]:

- **Mode connecté au réseau:** où, comme son nom l'indique, le microgrid est connecté au réseau et peut soit en tirer de l'énergie, soit y transférer de l'énergie. Dans ce cas, si une perturbation quelconque se produit, le microgrid est automatiquement déconnecté et commence à fonctionner sous le mode îlot qui est le second mode.
- **Mode îlot:** dans ce mode, le microgrid fonctionne de manière autonome. Son objectif est de répondre aux besoins des consommateurs locaux en générant la quantité d'énergie nécessaire sans dépendre du réseau de distribution.

Le microgrid peut passer à ce mode si le réseau électrique connaît une quelconque perturbation et revient ensuite au mode connecté au réseau.

4.2.2. Les avantages de microgrid

Les avantages des microgrid incluent [3]:

- Permettre la modernisation du réseau et l'intégration de plusieurs technologies.
- Améliorer l'intégration des sources d'énergie distribuées et renouvelables qui aident à réduire la charge de pointe et à réduire les pertes en localisant la production près de la demande.
- Répondre aux besoins des utilisateurs en garantissant l'approvisionnement en énergie pour des charges critiques, en contrôlant la qualité et la fiabilité de l'énergie au niveau local et en encourageant la participation des clients grâce à la gestion de la demande et à la participation communautaire à l'approvisionnement en électricité.
- Soutenir la microgrid en manipulant les charges sensibles et la variabilité des énergies renouvelables localement et en fournissant des services auxiliaires au système d'alimentation.

4.2.3. Le Mini grid

Un mini-grid est un système énergétique intégré constitué de charges interconnectées et de ressources énergétiques réparties, y compris des générateurs et des dispositifs de stockage d'énergie qui, en tant que système intégré, peuvent fonctionner en parallèle avec le réseau de distribution ou dans un mode d'îlotage intentionnel [4]. Un mini-grid moderne peut inclure la production renouvelable et à base de combustibles fossiles, les installations de stockage d'énergie et le contrôle de la charge. Il est aussi évolutif, de sorte que la capacité de production supplémentaire peut être ajoutée pour répondre aux charges croissantes. Les avantages des mini-grid d'énergie sont [5] :

- offrent des possibilités d'amélioration de la production et de l'accès à l'énergie.
- Évacuer une production diesel coûteuse.
- Utiliser les ressources locales d'énergie renouvelable dans la conception du système.
- Disposer des systèmes solaires domestiques et des appareils d'éclairage hors réseau.
- Fournir de l'énergie pour des applications commerciales et agricoles (pas seulement pour un usage résidentiel).
- Créer des emplois locaux.
- Fournir des avantages environnementaux.

4.3. Le Réseau intelligent (Smart Grid)

4.3.1. Qu'est-ce qu'un Smart Grid ?

Le réseau intelligent ou, Smart Grid fait généralement référence à une catégorie de technologies que les gens utilisent pour intégrer les systèmes de distribution d'électricité, en utilisant la télécommande et l'automatisation assistées par ordinateur. Ces systèmes sont rendus possibles par les technologies de communications numériques bidirectionnelles et le traitement informatique qui ont été utilisés [6-9]. La figure. 4.2 montre une architecture d'un smart grid.

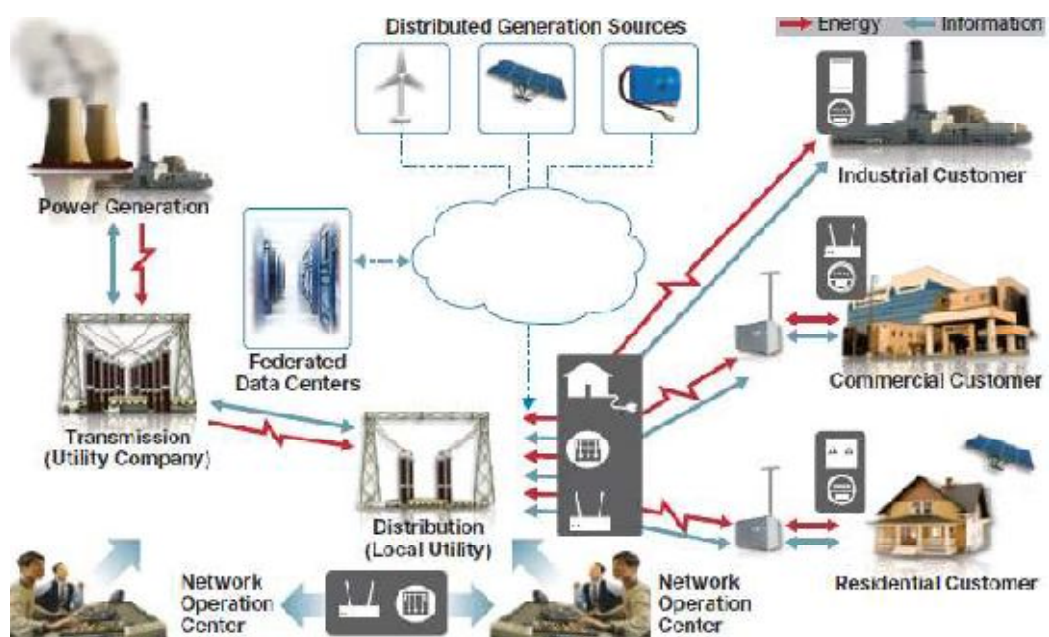


Figure. 4.2 : Architecture du smart grid [10].

4.3.2. Le rôle et les avantages de Smart Grid

Dans ces dernières années, le développement de la technologie Smart-Grid a été considéré comme l'une des plus grandes réalisations du secteur, grâce au déploiement de sources d'énergie renouvelables (RES) et à l'application d'un algorithme de contrôle sophistiqué sur les convertisseurs. Il existe plusieurs outils nécessaires pour obtenir les avantages que nous envisageons de Smart-Grid. Pour mériter l'attribut "Smart", le Grid doit être exploité selon un ensemble d'exigences spécifiques, à savoir [11]:

- fonctionnement autonome sans dépendance énergétique des réseaux électriques externes ;
- fonctionnement avec un équilibre production-consommation équitable ;
- possibilité de stockage d'énergie ;

- utilisation prédominante des sources d'énergie renouvelables;
- capacité de servir des charges non traditionnelles ;
- nouveau type de protection du réseau permettant un flux de puissance bidirectionnel ;
- Gestion active de la demande.

En raison de la nature stochastique des RES, l'un des principaux problèmes associés que la période pendant laquelle ces sources produisent de l'énergie ne coïncide souvent pas avec la période où l'énergie est demandée. Il y a beaucoup de préoccupations. Flexibilité, variabilité, non-contrôlabilité de ces sources, et ils ont un impact sur la capacité à maintenir la puissance équilibre entre l'offre et la demande.

Nous gérons habituellement le côté de la demande pour aider à équilibrer l'offre. À l'heure actuelle, nous utilisons l'ensemble des réserves auxiliaires de l'offre, appelées services auxiliaires, pour réguler l'inadéquation entre l'offre et la demande. Cependant, l'augmentation rapide de la pénétration des RES réduit la contrôlabilité du côté de l'offre. Il est possible de gérer la puissance d'équilibrage nécessaire en utilisant le potentiel de flexibilité de la demande et du stockage d'énergie avec les RES, appelées Génération Distribuée. L'introduction de ressources énergétiques distribuées (ménages, consommateurs industriels et véhicules électriques avec stockage d'énergie), ainsi que l'introduction de technologies de l'information et de la communication supplémentaires dans le système électrique, créent une demande automatisée intéressante et innovante. Les principaux avantages de réseau intelligente peuvent être résumés à :

- Adaptatif: besoins des consommateurs et conditions changeantes.
- Prédicative: quand il s'agit de pannes de courant.
- Intégré et interactif: communication entre producteur et consommateur.
- Optimisé: augmentez l'efficacité, la fiabilité et la performance économique.
- Favorable à l'environnement: utilisation importante de RES.
- Sécurisé: moins de perturbations.

4.4. Gestion de l'énergie

4.4.1. Principe de la gestion de l'énergie

Jusqu'à présent, dans les systèmes d'alimentation décentralisés, une optimisation instantanée est utilisée, ce qui optimise l'utilisation de l'équipement uniquement dans l'intervalle d'optimisation actuel [12]. L'utilisation du stockage nécessite toutefois une optimisation qui tient également compte des parties intégrantes dans le temps du flux de charge. D'autre part, les composants du système d'énergie peuvent être divisés en catégories production, consommation et stockage, tous offrant des possibilités pour l'optimisation de l'allocation d'énergie à court terme [13]. Avec le système de gestion mis au point non seulement la production d'électricité des centrales conventionnelles à répartition à plus court terme, mais aussi le stockage et les charges contrôlables ou commutables sont programmés (figure. 4.3). La gestion détermine les niveaux de commutation moyens de tous les composants du système d'alimentation dans chaque intervalle de temps d'optimisation [14]. Ces niveaux décrivent la demande moyenne ou la production par rapport à la puissance maximale des composants. Ils sont meilleurs si la fonction cible devient minimale, qui contient tous les coûts pour répartir le système d'énergie en fonction des niveaux de commutation correspondants. En plus des coûts de production d'électricité, les coûts constants pour les contraintes violées ainsi que les coûts supplémentaires sont pris en considération [15]. Ces coûts augmentent de façon exponentielle avec la probabilité croissante de manque de puissance.

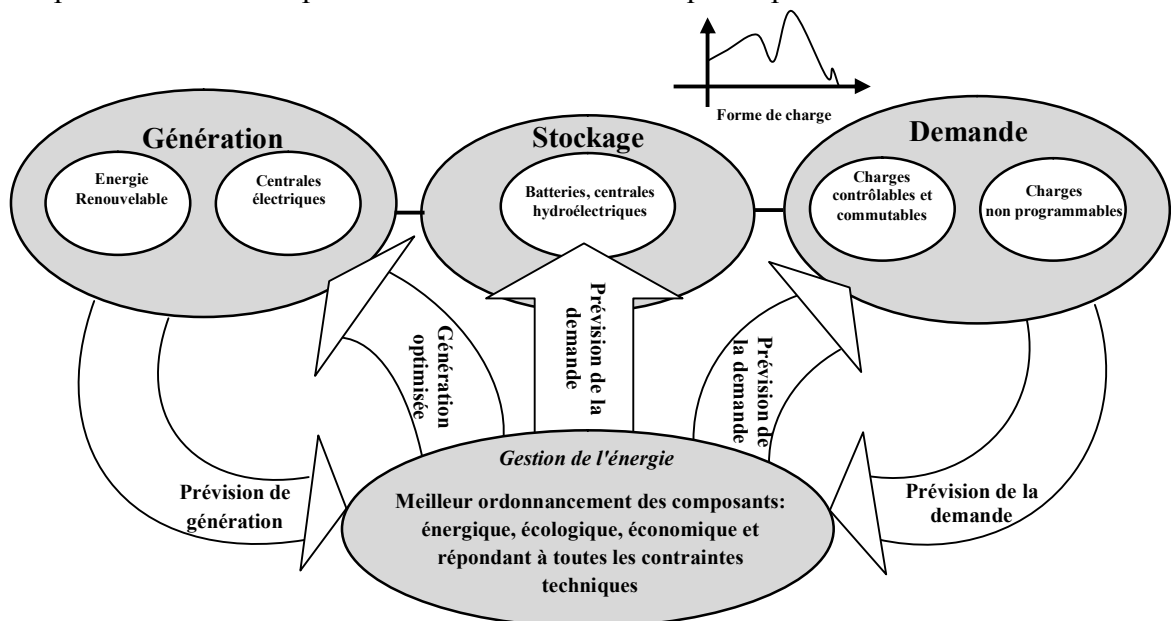


Figure. 4.3 : Principe du système de gestion de l'énergie [13].

4.4.2. Stratégies de gestion de l'énergie dans les Smart Grid

Au cours des dernières décennies, la façon dont l'électricité est générée, transmise, et consommée a changé. Le besoin de source d'énergie et en tant que fourniture d'énergie sûre qui ne dépend pas des combustibles fossiles sont l'objectif principal de la plupart des pays. Smart Grid avec intégration des sources d'énergie renouvelables répondent de cet objectif [16]. Dans les réseaux intelligents, des compteurs intelligents, des capteurs intelligents et une transmission instantanée de l'information bi-énergie entre les sources d'énergie et les consommateurs devraient être disponibles. Cette disponibilité permet au système de gérer avec succès la fourniture d'énergie aux consommateurs tout en permettant aux consommateurs d'avoir leurs propres décisions de consommation d'énergie. Bien que de nombreuses opportunités puissent être atteintes par les avantages de Smart, un certain nombre de défis peuvent être à l'origine de sources d'énergie renouvelables dans ces systèmes smart grid. Pour assurer une utilisation efficace et généralisée des sources d'énergie renouvelables dans les smart grids, une stratégie efficace de gestion de l'énergie devrait être envisagée.

Le succès de toute stratégie de gestion de l'énergie mise au point dépend de la nécessité que toutes les sources du système de réseau intelligent soient équipées de la technologie requise (directement ou via les interfaces électroniques de puissance) qui facilite l'interconnexion entre les différentes sources. Cette technologie numérique devrait inclure une surveillance continue et un contrôle et une supervision automatisés pour optimiser la distribution de la production d'électricité entre diverses sources afin d'économiser de l'énergie grâce à l'utilisation maximale des diverses sources. Réduire le coût de l'énergie du côté des consommateurs et améliorer la fiabilité sont les objectifs supplémentaires espérés atteindre en développant la stratégie de gestion de l'énergie. En outre, dans un système Smart Grid, la capacité d'étendre le système en incluant des sources supplémentaires ou en augmentant la capacité des sources existantes devrait être disponible. Par conséquent, la stratégie de gestion de l'énergie développée pour contrôler le flux d'énergie dans les réseaux intelligents devrait être flexible pour faire face à l'expansion de ce système.

Comme indiqué précédemment, la nécessité pour le système de contrôle de contrôler le flux d'énergie à l'intérieur du marché est essentielle pour assurer l'utilisation efficace des ressources d'énergies.

Le Tableau ci-dessus montre quelques techniques, citées dans la littérature, pour la gestion de la puissance dans les microgrids.

Tableau.4.1 : Approches de gestion d'énergie dans les systèmes microgrids.

Réf.	Configuration	Approche utilisée	Remarques
[17]	Microgrid- renouvelable avec batterie en tant que système de stockage.	Algorithme de Bat amélioré	L'idée de la stratégie de gestion est de développer des mesures correctives et d'effectuer des expéditions les moins coûteuses. L'objectif est de déterminer la taille optimisée du système de stockage de la batterie dans un micro grid qui inclut des sources d'énergie renouvelables. La fréquence de chargement et de déchargement du système de batterie a été réduite en tant qu'option de cette stratégie.
[18]	Sources renouvelables hybrides avec systèmes de stockage intégrés au réseau.	Logique flou	Les indicateurs suivants ont été pris en compte dans la méthodologie adoptée pour optimiser et concevoir la stratégie de gestion de l'énergie de contrôle: puissance, efficacité énergétique, évaluation économique, effets environnementaux et qualité de la tension.
[19]	Microgrid- PV / diesel / batterie	Algorithme de recherche de coucou basé sur le contrôleur de logique floue 'FLC'	Les entrées du contrôleur flou sont: le niveau de charge de la batterie et le débit d'alimentation net en fonction des puissances du système PV, de la puissance nominale du groupe électrogène diesel et de la capacité de la batterie.
[20]	Microgrid- renouvelables avec systèmes de stockage hybride	Algorithme de réseaux de neurones artificiels 'ANN'	Discute l'utilisation de la gestion de la demande DSM dans ce nouvel environnement de système électrique et présente une simulation qui utilise des données acquises à partir de compteurs numériques, crée des modèles de courbes de charge, utilise ces modèles pour charger et valider un ANN et utilise cette ANN pour classer de nouvelles données en utilisant ces modèles définis. Les résultats obtenus dans l'étude montrent que l'environnement de réseau intelligent facilite la mise en œuvre de DSM et l'utilisation de l'ANN a présenté une performance satisfaisante pour la classification des courbes de charge.

4.5. Développement d'un algorithme de gestion de l'énergie pour un système micro-grid en utilisant la modélisation et l'optimisation par un algorithme d'évolution différentielle chaotique basé sur l'apprentissage multi-cross

La pénétration de la production renouvelable distribuée dans les réseaux électriques à des moyennes et basses tensions augmente dans de nombreux pays à travers le monde. Le micro-réseau (MG) est une solution efficace pour incorporer des ressources énergétiques distribuées dans des systèmes d'alimentation réalisant des objectifs d'exploitation des réseaux environnementaux et économiques. L'une des applications importantes des MG est l'utilisation résidentielle ou commerciale modulaires pour les services sur site.

Les systèmes MGs peuvent être gérés de manière à ce qu'ils satisfassent la demande des clients à un coût d'exploitation minimum tout le temps. Une gestion adéquate est importante pour améliorer à la fois l'efficacité et la stabilité des systèmes hybrides. La gestion des unités MG nécessite un modèle économique précis pour décrire le coût d'exploitation en tenant compte de la production d'énergie de sortie. Ce modèle est discret et non linéaire dans la nature. Des outils d'optimisation efficaces sont donc nécessaires pour réduire les coûts d'exploitation à un niveau minimum.

Jusqu'à présent, de nombreux travaux de recherche ont été effectués sur l'ordonnancement optimal des opérations des systèmes d'alimentation et diverses méthodes d'optimisation ont été proposées pour résoudre les problèmes de répartition de l'énergie. Aussi, la minimisation des gaz polluants est un objectif important dans le fonctionnement d'un MG, compte tenu de la sensibilité de la communauté à contrôler et à diminuer les gaz à effet de serre au cours des dernières années.

4.5.1. Les démarches à suivre pour le développement de l'algorithme proposé pour la gestion de la puissance dans le MG

Les principales étapes à suivre pour le développement de l'algorithme proposé peuvent être résumées comme suit:

- Un modèle d'opération efficace de MG présenté avec des fonctions objectives plus complètes et des contraintes pratiques. Le MG proposé comprend la disponibilité des éoliennes, des générateurs diesel, des cellules photovoltaïques et de leur

contrôleur de MPP, du stockage hydrogène fuel, de batteries et de son contrôleur de charge/décharge et des convertisseurs DC/DC et AC/DC. De plus, des modèles quadratiques ajustables pour différents types de puissance sont utilisés pour les fonctions objectives du modèle d'optimisation de fonctionnement MG.

- Un algorithme d'évolution différentielle chaotique basé sur l'apprentissage multi-cross (MLCDE) est proposé pour résoudre le problème d'optimisation de l'opération MG. L'algorithme proposé peut bénéficier d'une capacité d'exploration plus élevée basée sur sa recherche chaotique et les opérateurs multi-cross couvrant différentes zones de l'espace de solution. Également, il a une capacité d'apprentissage pour ajuster automatiquement ses paramètres. En outre, un mécanisme de réparation efficace est utilisé tout au long du processus d'optimisation pour améliorer le comportement de convergence de l'algorithme.
- Une procédure de traitement binaire est proposée pour traiter les variables binaires de l'engagement de l'unité MG sans considérer les variables binaires comme des variables de décision indépendantes de l'algorithme d'optimisation, ce qui peut réduire considérablement la charge de calcul de l'approche proposée.

4.5.2. Architecture de Microgrid

L'architecture de MG considérée pour l'application représentée sur la figure. 4.4. Ce modèle de MG est constitué de micro-sources contrôlables et non contrôlables. Les générateurs PV et, celle turbine éolienne (WT) sont les non contrôlables micro-sources. En outre, un groupe de 3 générateurs diesel 'DEG' et un système de stockage composé de batteries et un système de production hydrogène à pile à combustible (H_2FC) constituent les micro-sources contrôlables. Il y a un seul point de connexion au réseau principale appelé point de couplage commun (PCC). LC est le contrôleur local associé aux unités/charges. Chaque LC reçoit ses points de consigne du contrôleur central MG (MGCC). L'ensemble de réseau électrique, de la charge DC et de la charge AC représente la demande. Ils contrôlent localement les unités ainsi que les charges qui sont connectées à la passerelle MG. La MGCC surveille la MG, coordonne les actions entre les LC et agit comme une interface entre la MG et le réseau principale. La MGCC optimise le fonctionnement du MG en fonction des sources de générateurs distribuées, de la vitesse du vent prévue, de l'irradiation solaire prévue, des charges prévues et des politiques d'exploitation et envoie des signaux de répartition aux LC.

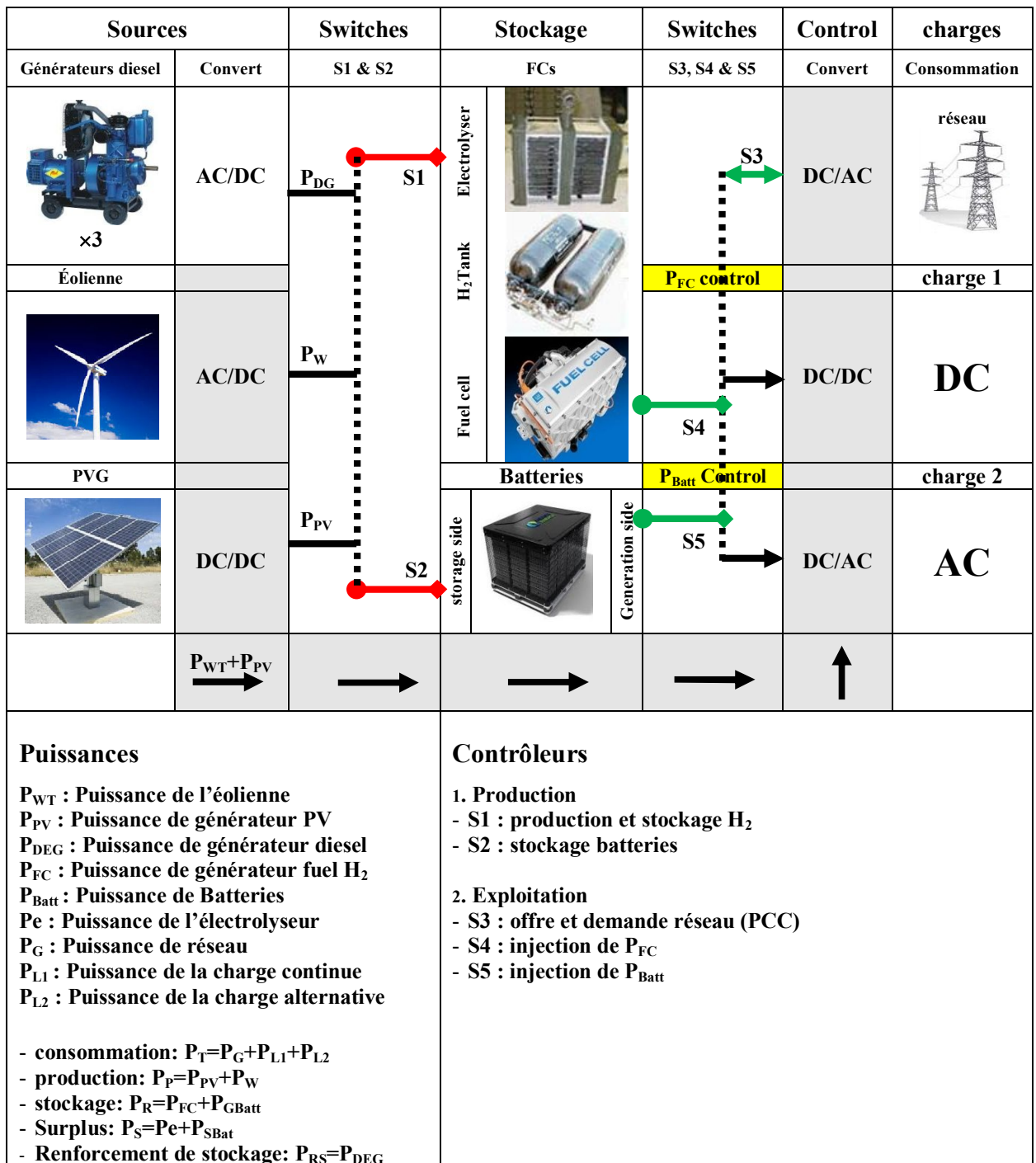


Figure. 4.4 : Architecture de MG.

4.5.3. Analyse de fonctionnement et traitement des données

Les modules PV sont connectés au contrôleur de suivi de point de puissance maximum (MPPTC) pour suivre la puissance de sortie maximale. De plus, en considérant les générations de sources non contrôlables, un jeu de batteries est utilisé pour un fonctionnement fiable du MG. Il y a un convertisseur entre le bus AC et le bus DC pour convertir l'alimentation AC en courant continu et vice versa. Dans cette étude, nous supposons que le mode de fonctionnement de la MG est connecté au réseau et que PCC est donc fermé. L'apport de combustibles fossiles n'est requis que pour le générateur diesel, car le combustible pour le WT et le PV provient de la nature. Chaque composant du système MG est modélisé séparément en fonction de ses caractéristiques et contraintes. WT et la charge totale AC sont connectés au bus AC et les cellules PV ainsi que le jeu de batteries et d'hydrogène fuel sont connectés au bus DC. Les conditions de fonctionnement de MG sont présentées comme suit :

- L'ensemble des charge est alimenté directement par les sources renouvelables ;
- En cas de surplus de production renouvelables, la batterie mis en état de charge et l'électrolyseur activé afin de produire le H₂ ;
- Le stockage est prioritaire pour produire de l'hydrogène ;
- Si le surplus de la production n'utilise pas par le système de stockage, le réseau absorbe la puissance additive ;
- Dans le cas ou la demande est plus que la production, l'énergie emmagasiné sous forme hydrogène est prioritaire que celle des batteries ;
- Le réseau joue un rôle d'accumulateur de charges en cas de manque de production et de réserves.

4.5.4. Modèle d'optimisation proposé pour le fonctionnement de la MG

Dans cette section, le modèle d'optimisation de MG est introduit en utilisant les modèles de composants du MG présentés dans [21] et le flux d'énergie entre les différents générateurs, dispositifs de stockage et charges. Pour introduire le modèle d'optimisation MG, ses fonctions objectives sont d'abord introduites.

La première partie de la fonction objective du modèle est la somme des coûts de combustible et d'exploitation des générateurs MG à l'heure, notée C_t^{FO} , qui peut être exprimée comme suit:

$$C_t^{FO} = F_t^{DG} + C_t^{OP} + SC_t \quad 4.1$$

Où : C_t^{OP} indique les coûts d'exploitation et de maintenance (E&M) de MG, que les coûts du carburant, donné comme suit:

$$C_t^{OP} = \sum_{U=1}^{NT+2} P_t^U \times K_{OP}(U) \quad 4.2$$

L'indice U représente le type d'unité, c'est-à-dire : $U \in \{\text{DEG}, \text{WT}, \text{PV}\}$. NT le nombre de générateurs diesel. SC_t représente les coûts de démarrage des unités DG donné par:

$$SC_t = \sum_{GEN=1}^{NT} \left[hst_{GEN} + cst_{GEN} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-TF_t^{GEN}}{CLT^{GEN}}\right) \right] \right] \quad 4.3$$

Où : $GEN \in \{\text{MT}_1, \dots, \text{MT}_{NT}\}$; hst_{GEN} , cst_{GEN} et CLT^{GEN} sont respectivement des coûts de démarrage à chaud, de démarrage à froid et de constante de temps de refroidissement de l'unité GEN; TF_t^{GEN} est le moment où le générateur GEN a été éteint jusqu'à l'instant t. Le coût d'arrêt est considéré comme nul dans cette application et WT et PV n'ont aucun coût de carburant.

La deuxième partie de la fonction objective du modèle proposé est le coût total d'émission des gaz C_t^{EM} pour les unités MG donné par:

$$C_t^{EM} = \sum_{GEN=1}^{NT} \sum_g^{NT} GWP_g \times EM_{g,t}^{GEN} \quad 4.4$$

Ou: $g \in \{\text{CO}_2, \text{CO}, \text{NO}_2, \text{SO}_2\}$

Pour calculer le C_t^{EM} , les émissions gazeuses $EM_{g,t}^{GEN}$ des générateurs du MG, il faut d'abord calculer. Ensuite, EM_g^{GEN} pour chaque type d'émissions gazeuses est converti en son équivalent en dioxyde de carbone en utilisant le facteur de pondération GWP (potentiel de réchauffement global) et le dioxyde de carbone équivalent est converti en coût d'émission C_t^{EM} en utilisant le facteur de pondération (Tax_{CO_2}) comme montré dans (4.4). GWP et les taxes CO_2 utilisées dans ce travail proviennent de [22].

La première fonction objectif TOF(.), composée du premier et les secondes parties peuvent être exprimées comme suit:

$$TOF(.) = \sum_{t=1}^T (C_t^{PO} + C_t^{EM}) \quad 4.5$$

La génération totale du bus AC, notée P_t^{AC} , représente le seconde cible a optimisé définie comme suit:

$$P_t^{AC} = \sum_{n=1}^{NT} P_{n,t}^{DEG} + P_t^{WT} + P_t^{PV} + P_t^{FC} + P_t^{Batt} - \frac{P_t^{RC}}{bn_{RC}} \quad 4.6$$

Où : $P_{n,t}^{DEG}$ représente la puissance des générateurs diesel; P_t^{WT} est la puissance de sortie de WT à l'instant t; Les bn_{RC} sont les efficacités du convertisseur AC/DC dans les modes onduleur et redresseur; P_t^{PV} , P_t^{FC} , P_t^{Batt} et P_t^{RC} indiquer respectivement les puissances du générateur photovoltaïque, du pile à combustible, du batterie et de onduleur/redresseur à temps t.

4.5.5. Algorithme d'optimisation

La fonction objective du problème d'optimisation est multiple consiste :

- TOF(.) définie dans (4.5) qui doit être minimisée avec les composants C_t^{EFO} e C_t^{EM} présentés respectivement dans (4.1) et (4.4).
- $P_{n,t}^{AC}$ définie dans (4.6) qui doit être maximisée.

En outre, les contraintes du problème incluent :

- les limites de stockage d'énergie de batterie que le niveau de réservoir d'hydrogène [22] :

$$BD_t = \max(E_{t-1}^{BATT} - E_t^{BATT} . 0) . \quad t = 1 \dots T \quad 4.7$$

$$BC_t = \max(E_t^{BATT} - E_{t-1}^{BATT} . 0) . \quad t = 1 \dots T \quad 4.8$$

$$BC_{if} \leq NV_{FC} . BD_{if} \leq d_{FCT} . \quad t = 1 \dots T \quad 4.9$$

$$E_{min}^{BATT} \leq E_t^{BATT} \leq E_{max}^{BATT} . \quad t = 1 \dots T \quad 4.10$$

$$E_{pr}^{BATT} \leq E_t^{BATT} \quad 4.11$$

- les limites de capacité de rampe pour les générateurs diesel [23] :

$$UC_{m,t}^{DEG} PN_{m,t}^{DEG} \leq PN_{m,t}^{DEG} \leq UC_{m,t}^{DEG} PX_{m,t}^{DEG} . \quad \forall t. \forall m \quad 4.12$$

$$PN_{m,t}^{DEG} = \max(P_{min,m}^{DEG} . P_{m,t-1}^{DEG} - RD_m^{DEG}) . \quad \forall t. \forall m \quad 4.13$$

$$PX_{m,t}^{DEG} = \min(P_{max,m}^{DEG} . P_{m,t-1}^{DEG} + RU_m^{DEG}) . \quad \forall t. \forall m \quad 4.14$$

- la contrainte d'équilibre de puissance de MG :

$$P_t^{LOAD} - P_t^{AC} = 0, \quad t = 1, \dots, T, \quad m = 1, \dots, ND \quad 4.15$$

L'algorithme d'optimisation proposé est utilisé pour résoudre le problème d'optimisation ci-dessus. C'est une méthode de recherche stochastique efficace, inspirée de l'algorithme d'évolution différentielle (DE), appelée DE chaotique à apprentissage multi-cross (MLCDE). Dans ce qui suit, le DE classique est d'abord présenté, puis le MLCDE proposé est présenté. DE est une méthode de recherche stochastique basée sur la population comprenant des individus NP, qui recherchent en parallèle l'espace de solution basé sur une fonction de gradient. Chaque individu de la population DE, noté $X_i^K = [X_{i,1}^K \dots X_{i,D}^K]$, $i = 1, \dots, NP$, $k = 1, \dots, MI$, est un tableau unidimensionnel incluant des variables de décision du problème d'optimisation. Dans X_i^K , l'élément $X_{i,j}^K$ représente la $j^{\text{ème}}$ variable de décision de i^{th} individu dans $k^{\text{ème}}$ itération DE; D et NI indiquent le nombre de variables de décision du problème d'optimisation et le nombre d'itérations DE, respectivement. La performance de l'algorithme DE peut être résumée comme la procédure étape par étape suivante. Sans perte de généralité, on suppose qu'un problème de minimisation, comme le problème d'optimisation du fonctionnement de MG, est résolu.

- Étape 1: Initialisation de la population initiale: Initialiser aléatoirement des variables de décision d'individus $X_{i,j}^K$ dans les plages autorisées.
- Étape 2: Évaluation des individus: Ici, la valeur de fonction objective est calculée pour chaque individu de la population.
- Étape 3: Opération de mutation: l'opération de mutation génère un vecteur d'essai pour chaque individu comme suit:

$$V_i^K = X_{i1}^K + F.(X_{i2}^K - X_{i3}^K) \quad K = 1,2,\dots, NI \quad 4.16$$

Où : X_{i1}^K , X_{i2}^K et X_{i3}^K sont trois individus choisis au hasard parmi la population dans l'itération k telle que $1 \leq i1 \neq i2 \neq i3 \leq NP$; F est le facteur d'échelle de l'algorithme DE, contrôlant l'amplification de la variation différentielle; V_i^K est le vecteur d'essai produit pour X_i^K .

- Étape 4: Opérateur de croisement: Supposons que $V_i^K = [V_{i,1}^K, V_{i,2}^K, \dots, V_{i,D}^K]$ et $X_i^K = [X_{i,1}^K, X_{i,2}^K, \dots, X_{i,D}^K]$. L'opérateur de croisement génère la progéniture $Y_i^K = [y_{i,1}^K, y_{i,2}^K, \dots, y_{i,D}^K]$ correspondant au parent X_i^K comme suit:

$$y_{ij}^{k,1} = \begin{cases} v_{ij}^k & \text{Si } \text{Rand} \leq \text{CR}_i \quad \text{ou} \quad j = J_{\text{rand}} \\ x_{ij}^k & \text{Si } \text{Rand} = \text{CR}_i \quad \text{et} \quad j \neq J_{\text{rand}} \end{cases} \quad (4.17)$$

Où : CR indique le taux de croisement dans l'intervalle [0,1] et la fonction Rand génère un nombre aléatoire uniformément réparti dans l'intervalle [0,1]. Pour chaque $Y_{i,j}^K$ un nombre aléatoire distinct est généré par cette fonction. Après avoir produit la progéniture Y_i^K , sa valeur est calculée.

- Étape 5 : Mécanisme de sélection: le mécanisme de sélection de l'algorithme DE est déterministe pour sélectionner X_i^{K+1} de la prochaine génération entre X_i^K et sa progéniture Y_i^{K+1} .
- Étape 6 : Condition d'arrêt: Si le nombre d'itérations $k < \text{NI}$, incrémenter k et revenir à l'étape 3; sinon, renvoyez le meilleur individu avec la valeur la plus basse de la fonction cible comme solution finale. Dans l'algorithme DE, F, CR, NP et NI sont des paramètres définis par l'utilisateur.

L'opérateur de croisement, c'est-à-dire l'étape 4, de l'algorithme proposé génère quatre individus de la progéniture, dénotés par : $Y_i^{K+1}, Y_i^{K+2}, Y_i^{K+3}$ et Y_i^{K+4} : comme suit:

$$y_{ij}^{k,1} = \begin{cases} v_{ij}^k & \text{Si } \text{Rand} \leq \text{CR}_i \quad \text{ou} \quad j = J_{\text{rand}} \\ x_{ij}^k & \text{Si } \text{Rand} = \text{CR}_i \quad \text{et} \quad j \neq J_{\text{rand}} \end{cases} \quad \begin{cases} 1 \leq i \leq \text{NP} \\ 1 \leq j \leq D \end{cases} \quad (4.18)$$

$$y_{ij}^{k,2} = x_{ij}^k + \text{Ch}_{ij}^k \cdot (x_{ij}^k - v_{ij}^k) \quad 1 \leq i \leq \text{NP}, \quad 1 \leq j \leq D \quad (4.19)$$

$$y_{ij}^{k,3} = x_{ij}^k + \text{Ch}_{ij}^k \cdot (v_{ij}^k - x_{ij}^k) \quad 1 \leq i \leq \text{NP}, \quad 1 \leq j \leq D \quad (4.20)$$

$$y_{ij}^{k,4} = v_{ij}^k + \text{Ch}_{ij}^k \cdot (v_{ij}^k - x_{ij}^k) \quad 1 \leq i \leq \text{NP}, \quad 1 \leq j \leq D \quad (4.21)$$

Dans (4.18), la première progéniture Y_i^{K+1} est construite de manière similaire à Y_i^K dans (4.17) sauf qu'un CR distinct est considéré pour chaque individu. Ces valeurs sont également obtenues à partir du mécanisme d'apprentissage de [24]. J_{rand} est un index choisi au hasard. Les trois progénitures suivantes les individus sont construits en utilisant le vecteur d'essai V_i^K et le parent X_i^K sur la base de la procédure chaotique montrée dans [24,25]. La performance de cette procédure est illustrée sur la figure. 4.5 où $X_{i,j}^{\min}$ et $X_{i,j}^{\max}$ représentent les limites minimum et maximum admissibles pour la variable de décision j .

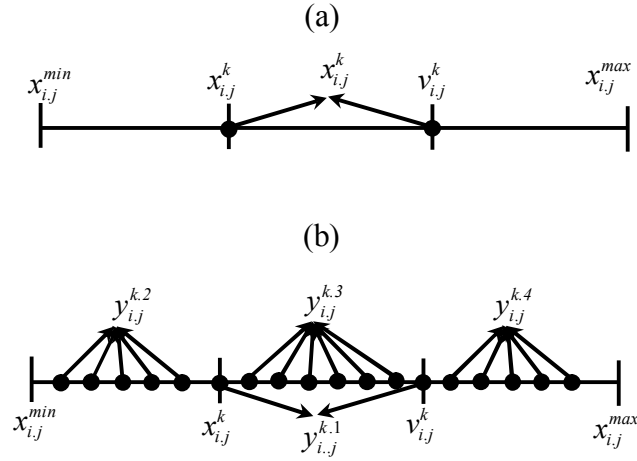


Figure. 4.5 : (a) Crossover DE classique et (b) crossover MLCDE.

Enfin, l'étape 5 de l'algorithme propose implémente une sélection déterministe de mécanisme définir comme suit:

$$M = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{TOF}(Y_i^{k,1}) \cdot \text{TOF}(Y_i^{k,1}) \cdot \text{TOF}(Y_i^{k,3}) \\ \text{TOF}(Y_i^{k,4}) \cdot \text{TOF}(X_i^k) \end{array} \right\} \quad 4.22$$

$$X_i^{k+1} = \begin{cases} Y_i^{k,1} & \text{Si } \text{TOF}(Y_i^{k,1}) = M, \quad 1 \leq i \leq NP \\ Y_i^{k,2} & \text{Sinon } \text{TOF}(Y_i^{k,2}) = M, \quad 1 \leq i \leq NP \\ Y_i^{k,3} & \text{Sinon } \text{TOF}(Y_i^{k,3}) = M, \quad 1 \leq i \leq NP \\ Y_i^{k,4} & \text{Sinon } \text{TOF}(Y_i^{k,4}) = M, \quad 1 \leq i \leq NP \\ Y_i^k & \text{Sinon } \text{TOF}(Y_i^k) = M, \quad 1 \leq i \leq NP \end{cases} \quad 4.23$$

4.5.6. Application de l'algorithme d'optimisation

L'algorithme d'optimisation proposé est appliqué pour résoudre le problème d'optimisation de l'opération MG. En outre, la gestion des contraintes du modèle d'opération MG et différentes variables de décision du problème d'optimisation est détaillée dans cette section. L'application du MLCDE proposée représentée graphiquement dans l'organigramme de la figure. 4.6, qui peut être décrit comme l'algorithme pas à pas suivant:

$$X_i^k = \left(\begin{array}{c} \text{Continu} \\ \underbrace{P_{i,m,1}^{k,DEG}, \dots, P_{i,m,T}^{k,DEG}, P_{i,n,1}^{k,MT}, \dots, P_{i,n,1}^{k,MT}, E_{i,1}^{k,BATT}, \dots, E_{i,1}^{k,BATT}}_{M=1, \dots, ND, n=1, \dots, NT} \end{array} \right) \quad 4.24$$

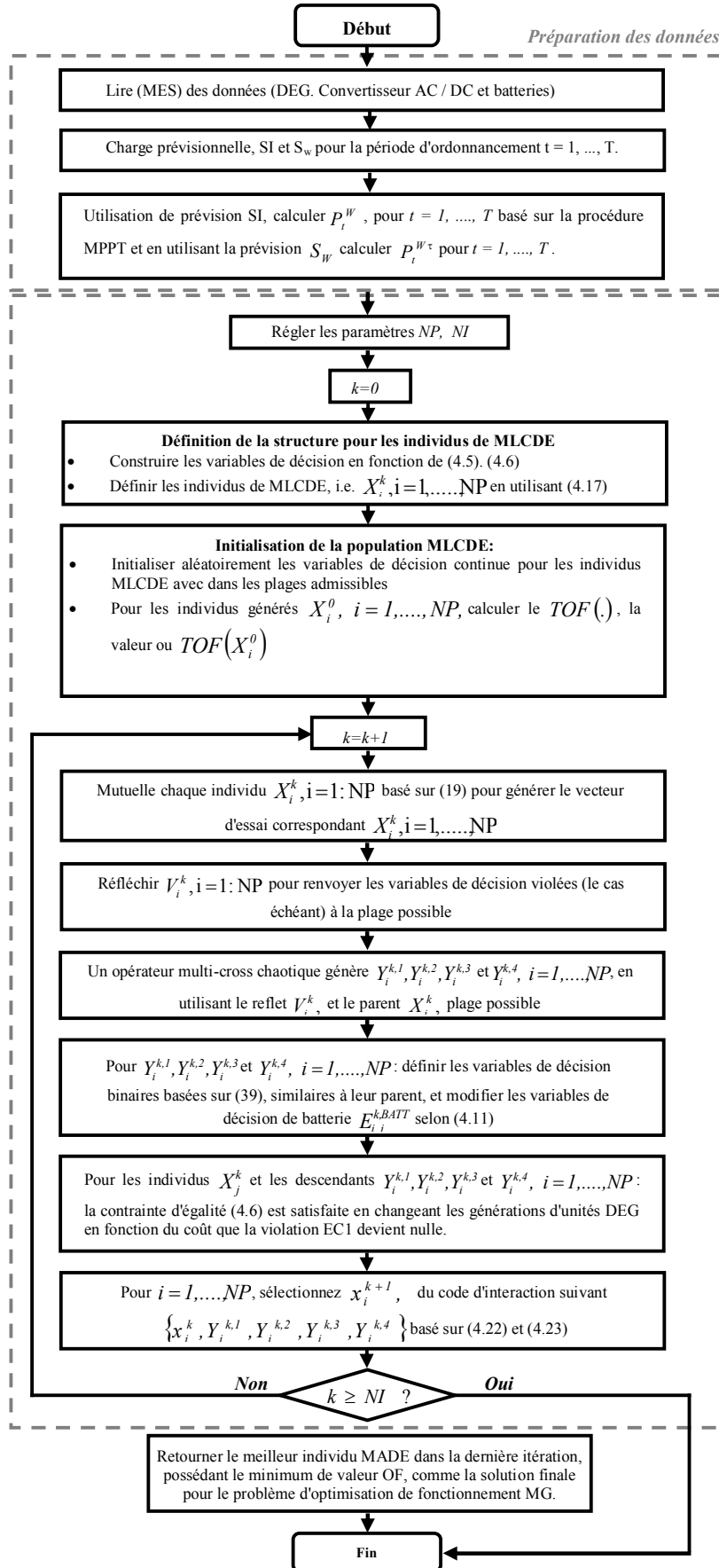


Figure. 4.6 : Organigramme du MLCDE proposée.

On voit que chaque individu de MLCDE inclut les variables de décision continues du modèle proposé pour l'optimisation du fonctionnement de MG. Dans ce travail, une nouvelle procédure de traitement binaire est proposée pour déterminer les variables de décision binaires sur la base des variables de décision continues. En considérant la figure. 4.7, la variable binaire indiquant l'état MARCHÉ/ARRÊT des générateurs diesel dans l'intervalle de temps t pour l'itération individuelle dans $k^{i\text{ème}}$ de MLCDE, est définie comme suit:

$$UC_{i,m,t}^{k,DEG} = \begin{cases} 0 & \text{Si } P_{i,m,t}^{k,DEG} < P_{min,m}^{DEG} \\ 1 & \text{Si } P_{i,m,t}^{k,DEG} \geq P_{min,m}^{DEG} \end{cases} \quad 4.25$$

De même, la variable binaire $UC_{i,m,t}^{k,DEG}$ est déterminée sur la base de $P_{i,m,t}^{k,DEG}$. La procédure de traitement binaire proposée peut effectivement éviter des solutions irréalisables et ainsi mieux dépenser la capacité de recherche de la méthode pour rechercher la région possible de l'espace de solution. Ainsi, le MLCDE devrait seulement initialiser et faire évoluer les variables de décision continue du problème.

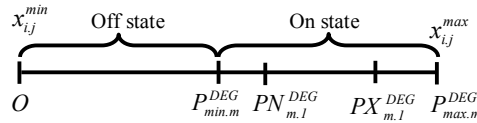


Figure. 4.7 : États ON/OFF de marche des DEGs considérant sa plage de fonctionnement.

L'étape 2 près de la génération de la population initiale de MLCDE ($k = 0$): Pour chaque variable de décision $P_{i,m,t}^{k,DEG}$ ($i = 1, \dots, NP, t = 1, \dots, T$) de l'individu, un nombre aléatoire avec une distribution uniforme $R_{i,m,t}^{DEG}$ est généré séparément dans l'intervalle $0; P_{GEN}^{Max,m}$. Sur la base de $R_{i,m,t}^{k,DEG}$, la variable binaire correspondante la variable continue $P_{i,m,t}^{DEG}$ est initialisée comme suit:

$$\begin{aligned} \text{Si } R_{i,m,t}^{DEG} < P_{min,m}^{DEG} &\Rightarrow UC_{i,m,t}^{0,DEG} = 0, P_{i,m,t}^{0,DEG} = 0 \\ \text{Si } P_{min,m}^{DEG} \leq R_{i,m,t}^{DEG} < P_{N_{m,l}}^{DEG} &\Rightarrow UC_{i,m,t}^{0,DEG} = 0, P_{i,m,t}^{0,DEG} = P_{m,t}^{DEG} \\ \text{Si } P_{N_{m,l}}^{DEG} \leq R_{i,m,t}^{DEG} < P_{X_{m,l}}^{DEG} &\Rightarrow UC_{i,m,t}^{0,DEG} = 0, P_{i,m,t}^{0,DEG} = P_{m,t}^{DEG} \\ \text{Si } P_{X_{m,l}}^{DEG} \leq R_{i,m,t}^{DEG} < P_{max,m}^{DEG} &\Rightarrow UC_{i,m,t}^{0,DEG} = 0, P_{i,m,t}^{0,DEG} = P_{m,t}^{DEG} \end{aligned} \quad 4.26$$

$t = 1, \dots, T, m = 1, \dots, ND, i = 1, \dots, NP$

Comme le montre la première rangée de (4.26), si $R_{i,m,t}^{DEG}$ est inférieur à $P_{i,m,t}^{DEG}$, alors $UC_{i,m,t}^{DEG}$ devient zéro sur la base de (4.26). Pour initialiser les variables de décision $E_{i,m,t}^{BattG}$ on définit d'abord les limites suivantes:

$$EN_{i,t}^{0.BATT} = \max \left(\begin{array}{l} E_{\min}^{BATT}, E_{i,t-1}^{0.BATT} - d_{BATT}, \\ EN_{pr}^{BATT} - (T-t) \cdot d_{BATT} \end{array} \right), \quad t = 1, \dots, T \quad 4.27$$

$$EX_{i,t}^{0.BATT} = \min \left(E_{\max}^{BATT}, E_{i,t-1}^{0.BATT} + d_{BATT} \right), \quad t = 1, \dots, T \quad 4.28$$

Après avoir traité chaque individu de descendance, comme décrit dans la section précédente, leurs variables de décision satisfont les contraintes d'inégalité, soit (4.18-4.22) et sont dans les fourchettes possibles. Seule la contrainte d'égalité (4.27 et 4.28) doit être gérée pour chacun de ces individus et leurs parents en utilisant l'algorithme suivant pour chaque heure t . Soit EC_t une violation de la contrainte de bilan de puissance à l'instant t et PI_m^{DEG} indice de coût de production diesel donné comme suit:

$$EC_t = P_t^{LOAD} - P_t^{AC}, \quad t = 1, \dots, T \quad 4.29$$

$$PI_m^{DEG} = \frac{F_{\max}^{mDEG}}{F_{\max,m}^{DEG}} = \frac{dm}{F_{\max,m}^{DEG}} + e_m + (f_m \times P_{\max}^{DEG}) \quad 4.30$$

L'indice de coût de la nième FC, PI_n^{FC} , est similaire à (4.27 et 4.28). Si $EC_t > 0$, la puissance de système hydrogène contrôlables engagés est augmentée en considérant leurs indices de coût de production dans l'ordre croissant et les contraintes similaire à la batterie jusqu'à ce que la puissance totale accrue des générateurs H_2 soit égale à EC_t . Inversement, si $EC_t < 0$, la puissance fuel contrôlables engagés est diminuée en considérant leurs indices de coût de production dans l'ordre décroissant.

4.5.7. Résultats et analyses

Le modèle de fonctionnement du MG proposé ainsi que l'approche de solution proposée sont testés sur une MG avec la structure représentée sur la figure. 4.4. le MG comprend 250 kW C15DE6X, 200 kW C09DE33 et 100 kW D100-6 DEG, fabriqués par Caterpillar Corporation [21], désigné par DEG1, DEG2 et DEG3, respectivement. En outre, IMG est constituée d'un générateur d'hydrogène récupérée de 65 kW fabriquée par Capstone Corporation [25]. Pour représenter le DEG de secours dans le modèle d'opération MG, sa limite de capacité minimale est mise à zéro [26]. De cette

manière, le DEG peut être en état ON avec une sortie nulle, c'est-à-dire en état de veille. Le réglage puissance à zéro est appliqué aux générateurs diesel de 250 kW C15DE6X et 500 kW C15 dans nos boîtiers de test, qui peuvent être utilisés en veille selon leurs spécifications [27].

Les résultats obtenus pour l'optimisation de l'opération MG à partir de l'approche de solution proposée, à savoir MLCDE, sont présentés dans le tableau. 4.1 et comparés aux résultats obtenus à partir de deux autres méthodes d'optimisation, y compris les algorithmes génétique GA et l'algorithme d'optimisation par essaim de particules PSO. Les meilleurs, moyens et pires résultats, parmi 20 essais, pour chacune de ces méthodes sont présentés dans le tableau 4.2. En outre, le partage de charge individuel pour chaque type de sources, à savoir DEG1, DEG2, DEG3, FC, Batt, PV et WT, et la charge de MG sont rapportés dans les colonnes 6-13, respectivement. Les résultats des colonnes 6 à 13 sont liés à la meilleure piste de chaque méthode. On voit que les meilleurs, moyens et pires résultats de MLCDE sont meilleurs que les meilleurs moyens et pires des autres algorithmes d'optimisation.

Tableau. 4.1 : La vitesse du vent (SW), l'irradiation solaire (SI), la température (Temp) et les données de charge utilisées pour le scénario de base de simulation.

Heure	Sw(m/s)	SI(w/m ²)	Temps (C°)	Charge(Kw)	heure	Sw(m/s)	SI(w/m ²)	Temps (C°)	Charge(Kw)
1	10.4333	0.0000	23.650	632	13	6.9167	1018.1667	31.233	733
2	7.7833	0.0000	23.816	629	14	8.3667	868.1667	31.950	710
3	4.1333	0.0000	24.400	631	15	10.6000	847.5000	32.250	690
4	7.5000	0.0000	22.833	630	16	12.3167	778.6667	31.867	683
5	9.2167	0.0000	22.733	621	17	12.7833	368.3333	31.150	642
6	4.8000	0.6667	22.800	591	18	14.7667	410.5000	29.983	616
7	8.2000	75.0000	21.817	664	19	14.8000	207.3333	28.533	622
8	8.1333	288.5000	22.917	664	20	14.5833	76.6667	28.017	672
9	7.1500	477.5000	25.550	670	21	13.6333	5.6667	27.450	706
10	10.5333	456.8333	26.783	669	22	11.2833	0.0000	25.767	698
11	9.1667	776.1667	28.183	681	23	11.2833	0.0000	24.200	667
12	6.7667	951.1667	30.233	696	24	9.9500	0.0000	23.217	657

Tableau. 4.2 : Résultats de comparaison de différentes méthodes d'optimisation.

Méthode	Meilleur (S)	moyenne (S)	Pire (S)	Déviatoin standard	DEG1 (KWh)	DEG2 (KWh)	DEG3 (KWh)	FC (KWh)	Batt (KWh)	PV (KWh)	WT (KWh)	Charge (KWh)
MLCDE	2419.679	2419.689	2419.710	0.007006	1345.43	3928.97	220.00	1520.00	89.47	2213.92	4515.95	15.844
PSO	2420.054	2421.419	2423.502	0.771513	1360.69	4013.72	230.00	1560.00	89.71	2213.92	4515.95	15.844
GA	2420.440	2420.964	2421.437	0.252610	1365.51	4000.71	238.70	1560.00	95.50	2213.92	4515.95	15.844

4.6. Conclusion

Dans ce présent chapitre, les systèmes smart grids présentés en tant qu'une technologie moderne possible d'offrir une bonne solution économique et écologique pour contrôler l'offre et la demande d'énergie électrique des réseaux à multi sources. En outre la gestion de l'énergie est considérée. Un algorithme de gestion de l'énergie pour un système micro-grid en utilisant la modélisation et l'optimisation par un algorithme d'évolution différentielle chaotique basé sur l'apprentissage multi-cross est développé afin d'assurer de bonnes performances de gestion de fonctionnement des micros grid et économiser l'investissement de la production et l'exploitation idéale de l'énergie électrique.

4.7. Bibliographie

- [1] Zhao, Weiliang, et al. "Smart home electricity management in the context of local power resources and smart grid." (2014): 73.
- [2] Islam, M. A., et al. "Global renewable energy-based electricity generation and smart grid system for energy security." *The Scientific World Journal* 2014 (2014).
- [3] Balani, Spandana. "Smart Grid Technologies for Efficiency Improvement of Integrated Industrial Electric System." (2011).
- [4] Katsaros, Konstantinos, et al. "Information-centric networking for machine-to-machine data delivery: a case study in smart grid applications." *IEEE Network* 28.3 (2014): 58-64.
- [5] Lund, Henrik, et al. "4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems." *Energy* 68 (2014): 1-11.
- [6] KHORASANI, POURIA GOHARSHENASAN, Mahmood Joorabian, and SEYED GHODRATOLAH SEIFOSADAT. "A new proposal for the design of hybrid AC/DC microgrids toward high power quality." *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* 25.5 (2017): 4033-4049.
- [7] Gellings, Clark W. *The smart grid: enabling energy efficiency and demand response*. The Fairmont Press, Inc., 2009.
- [8] Frey, Sylvain, et al. "A holonic control architecture for a heterogeneous multi-objective smart micro-grid." *Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO), 2013 IEEE 7th International Conference on*. IEEE, 2013.
- [9] Vytelingum, Perukrishnen, et al. "Agent-based micro-storage management for the smart grid." *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Volume 1-Volume 1*. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010.
- [10] Maknouninejad, Ali, et al. "Optimal, nonlinear, and distributed designs of droop controls for DC microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.5 (2014): 2508-2516.
- [11] Mišák, Stanislav, et al. "A heuristic approach to Active Demand Side Management in Off-Grid systems operated in a Smart-Grid environment." *Energy and buildings* 96 (2015): 272-284.
- [12] Natesan, Chitra, et al. "Power management strategies in microgrid: A survey." *International Journal Of Renewable Energy Research* 5.2 (2015): 334-340.
- [13] Vivas, F. J., et al. "A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018): 126-155.
- [14] Xia, Yanghong, et al. "Power Management for a Hybrid AC/DC Microgrid With Multiple Subgrids." *IEEE Transactions on Power Electronics* 33.4 (2018): 3520-3533.
- [15] Yazdani, Arya, and Mehran Bidarvatan. "Real-time Optimal Control of Power Management in a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle: A Comparative Analysis." *SAE International Journal of Alternative Powertrains* 7.2018-01-9077 (2018).
- [16] Huang, Yanjun, et al. "Model predictive control power management strategies for HEVs: A review." *Journal of Power Sources* 341 (2017): 91-106.
- [17] Bahmani-Firouzi, Bahman, and Rasoul Azizpanah-Abarghoee. "Optimal sizing of battery energy storage for micro-grid operation management using a new improved bat algorithm." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 56 (2014): 42-54.
- [18] Robyns, Benoît, Arnaud Davigny, and Christophe Suedemont. "Methodologies for supervision of hybrid energy sources based on storage systems—A survey." *Mathematics and Computers in Simulation* 91 (2013): 52-71.
- [19] Berrazouane, Sofiane, and Kamal Mohammedi. "Parameter optimization via cuckoo optimization algorithm of fuzzy controller for energy management of a hybrid power

- system." *Energy conversion and management* 78 (2014): 652-660.
- [20] Macedo, M. N. Q., et al. "Demand side management using artificial neural networks in a smart grid environment." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015): 128-133.
- [21] Hemmati, Meisam, Nima Amjady, and Mehdi Ehsan. "System modeling and optimization for islanded micro-grid using multi-cross learning-based chaotic differential evolution algorithm." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 56 (2014): 349-360.
- [22] Chilvers, Jason, et al. "Realising transition pathways for a more electric, low-carbon energy system in the United Kingdom: Challenges, insights and opportunities." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 231.6 (2017): 440-477.
- [23] Richardson, Ian, et al. "Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model." *Energy and buildings* 42.10 (2010): 1878-1887.
- [24] Zhang, Jingqiao, and Arthur C. Sanderson. "JADE: adaptive differential evolution with optional external archive." *IEEE Transactions on evolutionary computation* 13.5 (2009): 945-958.
- [25] Technical Reference: Capstone Model C65 Performance. Capstone Turbine CO. <<http://www.multigen.com.au/wp-content/themes/multigen/docs/>>
- [26] Basu AK, Bhattacharya A, Chowdhury S, Chowdhury SP. Planned scheduling for economic power sharing in a CHP-based micro-grid. *IEEE Trans Power Syst* 2012; 27(1):30–8.
- [27] Zaltash A, Petrov A, Rizy DT. Environmental Aspects of Operating Various Gas Micro-turbines. Oak Ridge National Laboratory (ORNL). <<http://www.ornl.gov/webworks/cppr/y2001/pres/117769.pdf>> [accessed 28.10.13]

CONCLUSION GENERALE

Le cadre de cette thèse est la tendance vers l'étude des systèmes de production d'énergies base de sources renouvelables d'où, une chaîne de production d'origine renouvelable faite la base des travaux présentés. C'est le cas d'un grand nombre de nouveaux systèmes actifs, tels que les systèmes hybrides, le stockage de l'énergie, le raccordement aux réseaux, les Micro grids, les Smart grids et autres. En outre des différentes topologies et de nouvelles technologies de commandes et de contrôles sont appliquées afin de développer des structures des réseaux fiables et efficaces.

Au premier temps, une présentation d'une recherche consiste le contexte de la production de l'énergie renouvelable et les nouveaux paradigmes dans le marché de l'énergie électrique. Cette recherche faite le sujet de consultation des statistiques et des prévisions en relation avec la production et la consommation de l'énergie et les technologies modernes utilisées dans ce domaine pour faire face à l'augmentations des demandes, faire un équilibre offre/demande et pour d'autres recommandations. Par la suite, les topologies des chaînes de production de nature d'origine renouvelables à savoir le solaire photovoltaïque et l'éolienne ont été présentées. L'amélioration de rendement de ces chaînes est investigué a travers l'utilisation des techniques de commande avancées et des algorithmes d'optimisations fiables. Ainsi, les problèmes majeurs des sources renouvelables celles l'intermittence et la variabilité a été traité par la proposition des systèmes renouvelables hybrides qui sont caractérisées par la complicité de l'algorithme de commande. En utilisant les systèmes de stockages, spécifiquement le type indirecte celui l'hydrogène, la chaîne a été renforcer et les problèmes de l'intermittence et la variabilité ont été résolus. En outre, une application intéressante a été investiguée, elle consiste au raccordement du réseau d'une chaîne hybride hydrogène/photovoltaïque en utilisant la stratégie de commande par mode glissant. Des résultats de simulation ont montré la fiabilité du système proposé. Par la suite, les systèmes moderne multi source avec stockage de l'énergie ou le microgrid a été arboré bien que les réseaux intelligents ou Smart grid. La gestion de la puissance dans un microgrid a été proposé, afin de présenté un système Smart fiable et flexible, par l'utilisation de la modélisation et l'optimisation par un algorithme d'évolution différentielle chaotique basé sur l'apprentissage multi-cross.

Pour les futurs travaux, on cite :

- Chercher des topologies et des algorithmes simples et efficaces pour les systèmes des énergies renouvelable ;
- Intégrant des systèmes de stockage plus flexibles ;
- Traitement et rechercher a simplifier les réseaux intelligents embraqués ;
- Développement des lois et application des algorithmes plus fiable.

Annexe

Paramètres des modèles de simulation

Générateur photovoltaïque

Type	Fuji Electric Co. ELR-615-160Z, 50W
Puissance max	1500 W
Modules en série	5
Modules en parallèles	5
Courant de court-circuit	3.28 A
Tension de circuit ouvert	21.6 V

Générateur fuel

Type	Nexa Ballard 310-0027
Puissance max	1000 W
Nombre de cellules	40
Courant max	45 A
Tension nominale	28 V

Électrolyseur

Électrolyte	Alkaline
Section d'électrolyte	300 cm ²
Distance entre les électrodes	3.0×10 ⁻⁴
Température de l'électrolyseur	52 °C
Coefficient de transfert cathodique	0.5
Coefficient de transfert d'anode	0.3

Turbine éolienne GSAP

Puissance nominale	2.2 kW
Tension nominale	220 V
Fréquence nominale	50 Hz
Paires de pôles	2
Résistance du stator	2.9 Ω
Résistance du rotor	1.52 Ω
Inductance du stator	223 mH
Inductance du rotor	229 mH
Moment d'inertie	0.0048 Kg.m ²