



Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Génie électrique  
Ref : .....

جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة الكهربائية  
المرجع: .....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
***Doctorat LMD***

**Spécialité: Génie Electrique**

**Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant  
une pile à combustible, des supercondensateurs, des  
batteries, une éolienne et une source photovoltaïque**

Présentée par:

**Ilyes TEGANI**

Soutenue publiquement le: 04/06/2016

**Devant le jury composé de:**

Pr. Ammar Moussi	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr. Abdennacer Aboubou	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. Mohamed-Yacine Ayad	Maitre de Conférences 'A'	Co-Rapporteur	Université de Belfort-France
Pr. Mebarek Bahri	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Pr. Mourad Houabes	Professeur	Examineur	Université de Annaba
Dr. Mohamed Becherif	Maitre de Conférences 'A'	Invité	Université de Belfort-France

## Résumé

La modernisation du réseau électrique actuel est transcrite par de nombreuses exigences afin de rendre possible la vision d'un réseau plus intelligent. L'énergie renouvelable est l'une des substrats d'un réseau électrique du futur, issue de l'augmentation de l'utilisation de ces sources renouvelables. Sa conception et sa réalisation posent de nombreux problèmes, entre autres de complexité, aux spécialistes du domaine. De nombreuses évolutions seront nécessaires avant de parvenir à un réseau intelligent efficace qui utilise ces énergies alternatives, robuste et à grande échelle. Dans le cadre de cette thèse, nous pensons que l'élaboration réaliste et développée des scénarios pour la gestion de l'énergie d'un système hybride qui utilise des différentes sources renouvelables, à savoir , les panneaux photovoltaïques , les éoliennes et les piles à combustible, représente une étape préliminaire importante dans la compréhension des systèmes en jeu. Dans cette thèse, la gestion de l'énergie de ce système hybride est réalisée en utilisant une commande basée sur la notion de platitude avec des régulateurs de courant par mode glissant associés aux différents convertisseurs raccordés aux sources de notre système hybride. A partir des divers scénarios de gestion d'énergie proposés, une analyse de la complexité, de la modélisation et de la commande du système ainsi qu'une optimisation technico-économique ont été étudiés, consolidé par la présentation d'une application pour un micro smart grid. Enfin un banc d'essai à puissance réduite a été réalisé, dans un environnement d'une carte dSPACE1104 au sein de notre laboratoire MSE afin de valider le bon fonctionnement de notre gestionnaire d'énergie proposé pour un système hybride utilisant différentes sources renouvelables.

### **MOTS CLES:**

Réseaux intelligents, sources renouvelables, gestion de l'énergie, notion de platitude, régulateurs du courant, mode glissant, modélisation et commande, optimisation technico-économique.

## **Abstract**

The modernization of the existing power grid is transcribed by many requirements that should be realised in order to make the vision of a smarter grid possible. The renewable energy is one of the substrates of an electrical network of the future which results from the increasing use of these renewable sources. Its design and implementation pose many problems, including complexity, for the field specialists. Many changes will be needed before achieving an efficient smart grid that uses these alternative, robust and large-scale energies. As part of this thesis, we believe that realistic and advanced elaboration of scenarios for the energy management of a hybrid system that uses different renewable sources, namely, photovoltaic panels, wind turbines and batteries, represents an important preliminary step in the understanding of this kind of systems. In this thesis, the energy management of our hybrid system is realized by using a command based on the flatness notion with current regulators by sliding mode which are associated to the different converters connected to the sources of our hybrid system. From the various power management scenarios proposed, an analysis of the complexity, modelling, and control of the system as well as a technical-economic optimization had been studied, consolidated by an application for a micro smart grid. Finally, a test bench at reduced power has been realised in an environment of dSPACE1104 card in our MSE laboratory in order to validate the proper functioning of our energy manager proposed for the hybrid system that uses different renewable sources.

### **KEYWORDS:**

Smart grid, renewable sources, energy management, flatness notion, current regulator, sliding mode, command and modelling, technical-economic optimization.

## ملخص

ان تأجيل تحديث شبكة الكهرباء الحالية يرجع الى العديد من المتطلبات من أجل الوصول الى ما يسما بالشبكة الذكية. الطاقة المتجددة هي واحدة من ركائز وجود شبكة المستقبل الكهربائية، و الناتجة عن الزيادة في استخدام تكنولوجيات الاتصال المختلفة وكذا استغلال هذه المصادر المتجددة. ان تصميمها وتنفيذها بما تحمله هذه الطاقات المتجددة يطرح العديد من المشاكل حتى للمتخصصين في هذا المجال. ولهذا وجب ان تكون هناك تغييرات وتحسينات كثيرة من أجل التوصل إلى كفاءة عالية ، صلابة، واستخدام على نطاق واسع للشبكة التي تحوي هذه النظم البديلة. في هذه الأطروحة ، نحن نعد سيناريو واقعي ومتطور لإدارة الطاقة من النظام الهجين باستخدام مصادر الطاقة المتجددة المختلفة ، و التي هي الواح الطاقة الشمسية ، وتوربينات الرياح و بطاريات الوقود اعتمادا على نظام تحكم مبني على نظرية التسطیح مع استعمال نظام الوضع المنزلق للتحكم في التيارات المتعلقة بالمحولات المختلفة المرتبطة بكل مصدر للطاقة. كل هذا هو خطوة أولية هامة في فهم الأنظمة الهجينة وطرق استغلالها داخل الشبكات الذكية من هذه السيناريوهات ؛ التي ينجر عنها نقاط عديدة من تحليل ، ونمذجة و نظام تحكم من جهة ، و أمثلة تقنية واقتصادية من ناحية أخرى . كما نستعرض تطبيق لهاته المصادر البديلة داخل شبكة ذات حجم صغير . كما قمنا بإنشاء طاولة مخبرية باستعمال البطاقة الرقمية dSPACE للتأكد من فعالية التحكم المقترح لتسيير الطاقة الخاصة بالنظام الهجين المعتمد على عدة مصادر للطاقة المتجددة.

الكلمات المفتاحية:

الشبكات الذكية، الطاقات المتجددة، تسيير الطاقة، نظرية التسطیح، التحكم في التيارات، وضع الانزلاق، التحكم و النمذجة.

# Remerciemen

*Par ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse, en espérant n'avoir oublié personne...*

*Je tiens à remercier spécialement mon directeur de thèse **Pr. Abdennacer Aboubou**, je vous remercie d'avoir cru en mes capacités, pour le temps et la patience que vous m'avez accordés tout au long de ces années en me fournissant d'excellentes conditions logistiques. Je garderai dans mon cœur votre générosité, votre compréhension et votre efficacité. Pour tout ce que vous m'avez donné, je vous remercie très sincèrement.*

*Je tiens à remercier mon co-directeur de thèse **Dr. Mohamed Yacine Ayad** pour sa gentillesse, ses relectures et surtout d'avoir bien assuré le suivi et l'encadrement de mes travaux de thèse. Merci pour votre gentillesse, votre patience et vos précieux conseils. J'ai beaucoup apprécié travailler avec vous sur le plan scientifique que sur le plan humain.*

*Mes vifs remerciements sont adressés à monsieur **le Docteur Mohamed Becherif** (HDR à l'université de Belfort-France) pour son aide précieuse, ses qualités scientifiques et humaines, je vous exprime toute ma gratitude.*

*Je tiens à remercier aussi, mon cousin et mon enseignant monsieur **le Docteur Naimi Djemai** pour son aide, Je ne sais pas comment je vais vous exprimer ma gratitude !! Merci infiniment.*

*Mes sincères remerciements et ma gratitude vont aussi à **Pr. Ammar Moussi** pour avoir accepté de juger ce travail et d'en présider le jury de soutenance. Que vous soyez assuré de mon entière reconnaissance.*

Merci également Monsieur le **Professeur Mbarek Bahri** (directeur du laboratoire LMSE-Université de Biskra) qui a accepté de juger ce travail en tant qu'examineur, et pour la confiance qu'il m'a fait en m'accueillant comme doctorant au sein du laboratoire (LMSE). Je vous adresse mes sentiments les plus respectueux.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le **professeur Mourad Houabes** (Professeur à l'université de Annaba) qui m'a fait l'honneur d'accepter d'examiner et d'évaluer mon travail.

Mes remerciements vont aussi à tous mes collègues et les membres du laboratoire LMSE: **Dr. Mehamedi, Dr. Hamoudi, Dr. Saadi, Dr. Kraa, Dr. Khattara** et les doctorants: **Meziou Boubaker, Belhadi Yassine**, ainsi que tous les membres des laboratoires LGEB. Comme je remercie tous les membres du laboratoire FCLab en France pour leurs bienveillances, gentillesse et aides.

Je remercie ma famille à qui je n'ai jamais su dire toute l'affection que j'ai pour eux, mon père, ma mère, mon frère et mes sœurs qui ont été et seront toujours présents à mes côtés, merci pour votre soutien et vos encouragements.

J'adresse toute ma gratitude à tous mes ami(e)s et à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail.

## *Sommaire*

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Généralités sur les sources électriques hybrides .....</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction .....	5
1.2 Générateur photovoltaïque (GP).....	5
1.2.1 Les différents types de panneaux solaires.....	5
1.2.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque .....	7
1.2.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	9
1.2.4 Avantages et inconvénients d'un générateur photovoltaïque .....	10
1.3 Les éoliennes .....	10
1.3.1 La production mondiale .....	11
1.3.2 Les différents types de génératrices éoliennes .....	13
1.3.3 Production d'énergie électrique par éolienne .....	14
1.4 La pile à combustible.....	18
1.4.1 Les différents types de la pile à combustible .....	18
1.4.2 Caractéristique et modélisation des piles à combustible.....	21
1.4.3 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM.....	24
1.5 Batteries électrochimiques.....	24
1.5.1 Liaisons des batteries .....	25
1.5.2 Différent types des batteries électrochimique.....	26
1.5.3 Modélisation des batteries.....	28
1.6 Les Supercondensateurs .....	29
1.6.1 La construction des supercondensateurs .....	30
1.6.2 L'énergie emmagasinée dans un supercondensateur .....	32
1.6.3 Circuit équivalent d'un supercondensateur .....	32
1.6.4 Avantages et inconvénient des supercondensateurs.....	34
1.7 Conclusion.....	35

<b>2. "Smart grid" ou le réseau intelligent et les méthodes d'optimisation .....</b>	<b>36</b>
2.1 Introduction .....	37
2.2 Smart grid (SG) .....	37
2.2.1 Concept d'un Smart grid.....	38
2.2.2 La notion de l'intelligence dans un réseau électrique.....	40
2.2.3 La technologie d'un SG.....	44
2.3 Les méthodes d'optimisation .....	46
2.3.1 Les méthodes déterministes .....	46
2.3.2 Les méthodes stochastiques .....	47
2.4 Conclusion.....	54
<b>3. Conception du dimensionnement optimal d'un système hybride .....</b>	<b>56</b>
3.1 Introduction .....	57
3.2 Les systèmes hybride Photovoltaïque + Eolienne .....	57
3.3 Définition de l'optimisation.....	58
3.4 Formulation d'un problème d'optimisation.....	58
3.4.1 La fonction « Objectif ».....	59
3.4.2 Minimum global.....	59
3.4.3 Minimum local.....	59
3.5 Les contraintes.....	60
3.6 Dimensionnement des panneaux solaires .....	61
3.7 Dimensionnement des éoliennes .....	61
3.8 Dimensionnement du convertisseur (Onduleur DC/AC).....	61
3.9 Dimensionnement des batteries .....	62
3.10 Dimensionnement du contrôleur MPPT .....	62
3.11 Profile de charge.....	64
3.12 Modèle optimal via les algorithmes génétiques (AG) .....	65
3.12.1 Modèle via AG.....	65

3.12.2 Méthodologie du dimensionnement optimal.....	66
3.13 Étude de cas : Ville de Biskra.....	69
3.14 Résultats des optimisations.....	71
3.15 Hybridation Photovoltaïque+ éolienne+ pile à combustible .....	75
3.16 Les supercondensateurs dans un système hybride autonome.....	76
3.17 Conclusion.....	76
<b>4. Gestion de l'énergie et commande du système.....</b>	<b>78</b>
4.1 Introduction .....	79
4.2 Modélisation des convertisseurs associés au système hybride .....	79
4.3 Modèle mathématique du système hybride .....	84
4.4 Stratégie de commande du système hybride proposé.....	85
4.4.1 Notion de la commande par platitude .....	86
4.4.2 Régulation de l'énergie du système hybride et planification de la trajectoire de référence.....	87
4.4.3 Démonstration de la platitude du système hybride proposée.....	90
4.4.4 Loi de contrôle asymptotique et planification de la trajectoire de référence .....	93
4.5 Algorithme de l'énergie à travers la conception structurelle du système hybride .....	94
4.5.1 Algorithme de commande par énergie .....	94
4.5.2 Conception structurelle du système hybride .....	95
4.6 Dimensionnement du bus continu et convertisseurs associés aux sources.....	96
4.6.1 Convertisseurs Boost .....	96
4.6.2 Convertisseur Buck-Boost .....	99
4.7 Régulateurs du courant par mode glissant.....	100
4.8 Résultats de simulation.....	103
4.9 Validation expérimentale de la commande utilisée.....	115
4.9.1 Description du banc d'essai expérimental .....	116
4.9.2 Résultats expérimentaux .....	119
4.10 Conclusion.....	135
<b>5. Conclusion Générale et Perspectives .....</b>	<b>138</b>

## Liste des figures

Figure 1-1 Générateur Photovoltaïque Constitué De Plusieurs Panneaux Solaires .....	5
Figure 1-2 Cellules Solaire En Silicium Cristallin .....	6
Figure 1-3 Cellules Solaires Polycristallines .....	6
Figure 1-4 Cellules Solaires Monocristallines .....	7
Figure 1-5 Cellules Solaires En Couches Minces .....	7
Figure 1-6 Caractéristique I-V De Cellule Solaire Type "Sunpower210W" .....	8
Figure 1-7 Caractéristique P-V De Cellule Solaire Type "Sunpower210W" .....	8
Figure 1-8 Modèle Equivalent D'une Cellule Solaire .....	9
Figure 1-9 Production Mondiale De L'énergie Eolienne En 2014. ....	11
Figure 1-10 Production Mondiale De L'énergie Eolienne Pour Les Années 1997-2014. ....	12
Figure 1-11 Schéma D'une Génératrice Eolienne. ....	12
Figure 1-12 Schéma Représente Les Différentes Génératrices Eoliennes. ....	13
Figure 1-13 Caractéristique (Vitesse De Vent-Puissance) D'une Eolienne FUTUREENERGY-1kw .....	15
Figure 1-14 Caractéristique (Vitesse De Vent-Production Journalière) D'une Eolienne FUTUREENERGY-1kw .....	15
Figure 1-15 Fonction De Weibull: Probabilité De Distribution De Vitesse De Vent (Site: Biskra-Sud d'Algérie). ....	17
Figure 1-16 Principe De Fonctionnement D'une Pile A Combustible. ....	18
Figure 1-17 Prototype De Pile SOFC Réalisé Au Centre De Recherches De Jülich En Allemagne. ....	21
Figure 1-18 Caractéristique Idéale D'une Pile A Combustible .....	22
Figure 1-19 Modèle De La Pile PEMFC GREEN 500W Simulé Sous Matlab-Simulink .....	23
Figure 1-20 Caractéristique Tension-Courant De La Pile PEMFC GREEN 500W. ....	23
Figure 1-21 Une Cellule Typique D'une Batterie Electrochimique. ....	25
Figure 1-22 Liaison En Série Des Batteries .....	26
Figure 1-23 Liaison En Série Et En Parallèle Des Batteries .....	26
Figure 1-24 Modèle R-C D'une Batterie Au Plomb. ....	28
Figure 1-25 Caractéristique D'une Batterie Avec Tension De "Cut-Off" .....	29
Figure 1-26 Différence Entre Un Condensateur Classique (A Gauche) Et Un Supercondensateur (A Droite). ....	30
Figure 1-27 Structure D'un Supercondensateur (A Double Couche Electrique) .....	31
Figure 1-28 Circuit Equivalent D'un EDLC .....	32
Figure 1-29 Modèle De Premier Ordre D'un Supercondensateur .....	33
Figure 1-30 Modèle De J.R. Miller D'un Supercondensateur 0,64 F. ....	33
Figure 1-31 Modèle Energétique De Supercondensateurs A Couche Double Electrique. ....	34
Figure 2-1 Architecture D'un Smart Grid. ....	39
Figure 2-2 Infrastructure D'un Réseau Electrique Classique .....	41
Figure 2-3 Infrastructure D'un Réseau Electrique Intelligent. ....	42
Figure 2-4 Les Fourmis Convergeant Vers Le Chemin Le Plus Court .....	48

Figure 2-5 Processus De Trouver Une Solution Optimal Par AG .....	51
Figure 2-6 Opération De Croisement Dans Un Seul Point .....	53
Figure 2-7 Opération De Mutation D'un AG .....	54
Figure 3-1 Illustration Des Différents Minimums D'une Fonction Objectif .....	60
Figure 3-2 L'organigramme De La Méthodologie Du Dimensionnement Optimal Proposée .	67
Figure 3-3 Energie Moyenne Journalière Reçue Sur Une Surface Horizontale [Ville De Biskra] .....	69
Figure 3-4 Rayonnement Solaire Mensuelle Horizontal [Ville De Biskra] .....	69
Figure 3-5 Vitesse De Vent Mensuelle (M/S) [Ville De Biskra] .....	70
Figure 3-6 Profile De Charge. ....	70
Figure 3-7 La Puissance Produite Par Un Panneau Solaire Pendant Une Journée.....	70
Figure 3-8 La Puissance Produite Par L'éolienne Pendant Une Journée.....	71
Figure 3-9 Valeur De La Fonction "Objectif" [Premier Dimensionnement] .....	72
Figure 3-10 Valeur De La Fonction Objectif [Deuxième Dimensionnement].....	73
Figure 3-11 Résultats D'optimisation Par AG Limitation Des Ressources Du Générateur PV	74
Figure 3-12 Valeur De La Fonction Objectif [Troisième Dimensionnement].....	75
Figure 4-1 Architecture Du Système Hybride Autonome.....	80
Figure 4-2 Architecture D'un Convertisseur Boost Idéal. ....	81
Figure 4-3 L'architecture D'un Convertisseur Buck-Boost Idéal. ....	83
Figure 4-4 Schéma De Commande De Système Hybride. ....	94
Figure 4-5 Forme D'onde (Convertisseur "Boost").....	98
Figure 4-6 Forme D'onde (Convertisseur Buck-Boost) .....	100
Figure 4-7 Schéma De Contrôle Par Mode Glissant .....	101
Figure 4-8 Profile De La Charge .....	106
Figure 4-9 Tension De Bus Continu .....	106
Figure 4-10 Energie De Bus Continu Et Sa Référence .....	107
Figure 4-11 Variation De L'énergie Electrostatique Dans Le Bus Continu .....	108
Figure 4-12 Puissance Produite Par Les Sources Primaires.....	108
Figure 4-13 Puissance Produite Par Les Sources Secondaires.....	109
Figure 4-14 Puissance Des Supercondensateurs .....	110
Figure 4-15 Energie Fournit Par Les Supercondensateurs.....	110
Figure 4-16 Courant Des Supercondensateurs .....	112
Figure 4-17 Tension Des Supercondensateurs .....	112
Figure 4-18 Tension De La Source Photovoltaïque .....	113
Figure 4-19 Tension De La Pile A Combustible Et La Batterie .....	113
Figure 4-20 Courant De La Pile A Combustible.....	113
Figure 4-21 Courant De La Batterie.....	114
Figure 4-22 Courant De La Source PV .....	114
Figure 4-23 Puissance Délivrée Par La Source PV Et L'algorithme MPPT .....	115
Figure 4-24 Banc D'essai Expérimental .....	116
Figure 4-25 Les Panneaux Solaires Du Banc D'essai Expérimental.....	117
Figure 4-26 Schéma Synoptique De Carte D'interface. ....	118
Figure 4-27 Architecture De L'émulateur Electrique .....	119

Figure 4-28 Test Et Evolution De Courant De Batterie Après La Variation De Son Courant De Référence.....	120
Figure 4-29 Evolution De Courant De L'émulateur "Pile A Combustible" Après La Variation De Son Courant De Référence .....	121
Figure 4-30 Evolution De Courant De La Source Photovoltaïque Après La Variation De Son Courant De Référence .....	121
Figure 4-31 Evolution De Courant De La Source Photovoltaïque Pendant Le Test MPPT ..	122
Figure 4-32 Tension De La Source Photovoltaïque Pendant Le Test MPPT.....	122
Figure 4-33 Gestion De L'énergie Du Système Hybride [Scénario 1 Et 2] .....	123
Figure 4-34 Tension De Bus Continue [Scénario 1 Et 2].....	123
Figure 4-35 Courant De La Charge [Scénario 1 Et 2].....	124
Figure 4-36 Energie De Bus Continu Et Sa Référence [Scénario 1 Et 2].....	125
Figure 4-37 Courant De Référence De L'émulateur FC [Scénario 1 Et 2] .....	125
Figure 4-38 Courant De Référence De La Source PV [Scénario 1 Et 2].....	125
Figure 4-39 Courant De Référence De La Batterie [Scénario 1 Et 2].....	126
Figure 4-40 Courant De La Source PV [Scénario 1 Et 2].....	126
Figure 4-41 Courant De La Batterie [Scénario 1 Et 2] .....	126
Figure 4-42 Courant De L'émulateur FC [Scénario 1 Et 2] .....	127
Figure 4-43 Tension De L'émulateur FC [Scénario 1 Et 2] .....	127
Figure 4-44 Tension De La Source PV [Scénario 1 Et 2].....	128
Figure 4-45 Tension Des Batteries [Scénario 1 Et 2].....	128
Figure 4-46 Gestion De L'énergie Du Système Hybride [Scénario 3 Et 4] .....	129
Figure 4-47 Tension De Bus Continu [Scénario 3 Et 4] .....	130
Figure 4-48 Courant De Charge [Scénario 3 Et 4].....	130
Figure 4-49 Energie De Bus Continu Et Sa Référence [Scénario 3 Et 4].....	131
Figure 4-50 Courant De Référence De La Batterie [Scénario 3 Et 4].....	131
Figure 4-51 Courant De Référence De La Source FC Emulé [Scénario 3 Et 4].....	132
Figure 4-52 Courant De Référence De La Source PV [Scénario 3 Et 4].....	132
Figure 4-53 Courant De Batterie [Scénario 3 Et 4].....	133
Figure 4-54 Courant De L'émulateur De Stack [Scénario 3 Et 4].....	133
Figure 4-55 Courant De La Source Photovoltaïque [Scénario 3 Et 4].....	133
Figure 4-56 Tension De L'émulateur De Stack [Scénario 3 Et 4].....	134
Figure 4-57 Tension De La Source PV [Scénario 3 Et 4].....	134
Figure 4-58 Tension De La Batterie [Scénario 3 Et 4] .....	135

## ***Liste des Tableaux***

Tableau 1.1 Classification de la pile à combustible .....	19
Tableau 1.2 Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb[2].....	27
Tableau 2.1 les grandes nations initiatives dans le Smart Grid.....	43
Tableau 3.1 Estimation d'une consommation d'énergie d'une maison algérienne typique .....	65
Tableau 3.2 Paramètres utilisés pour l'AG .....	71
Tableau 3.3 Les résultats du dimensionnement optimal pour le système PV-WT.....	73
Tableau 3.4 Les résultats dimensionnement optimal pour le système PV-WT (3ieme cas)...	74
Tableau 4.1 Paramètre de la source photovoltaïque.....	103
Tableau 4.2 Paramètre de la source éolienne .....	104
Tableau 4.3 Paramètre de la pile à combustible .....	104
Tableau 4.4 Paramètre de la batterie utilisée.....	104
Tableau 4.5 Paramètre du supercondensateur .....	104
Tableau 4.6 Paramètres des convertisseurs .....	105

# Introduction Générale

# Introduction Générale

Avec le développement progressif de la vie moderne, la taille des villes, jour après jour ne cesse de s'épanouir. Actuellement, les villes contemporaines rencontrent deux problèmes majeurs, à savoir l'augmentation du nombre de la population et l'insuffisance en énergie. Les différentes technologies inventées durant ces 30 dernières années, ont participé dans l'augmentation de la demande d'énergie dans de multiples secteurs électriques. Cependant, l'énergie sollicitée par le développement de ces villes urbaines, ouvre une grande altercation sur ces sources de production notamment après les notes d'alerte sur l'épuisement des ressources classiques et conventionnelle. Pareillement, les études écologiques ont démontré que la consommation énergétique croissante est accompagnée par une augmentation énorme de l'émission des gaz toxiques dans l'atmosphère, ce qui cause la pollution de l'air et de l'eau.

Comptant tenu de cette situation, les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources et les méthodes de production renouvelable et écologique en exploitant les énergies propres sur la terre comme l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, géothermie...etc. Ils visent à réduire au minimum la demande de l'énergie provenant des ressources classiques, en conséquence, une ville durable est une ville propre dans son énergie, dans son climat et même dans sa nourriture.

D'autre part, l'évolution scientifique dans le domaine des communications et de l'automatisme, parallèlement avec l'exploitation des ressources renouvelables ont permis aux spécialistes de créer une nouvelle vision des réseaux électrique qui transportent et distribuent l'énergie requise. Les dispositifs physiques intégrés, tels que les appareils électroménagers qui deviennent de plus en plus intelligents et efficaces; sont équipés par des microprocesseurs embarqués ainsi que des émetteurs-récepteurs sans fil. Ces derniers offrent des capacités de communication illimitée et fournissent un comportement intelligent. Tout ceci nous mène à la création de ce qu'on appelle une maison intelligente, où la mesure avec précision des conditions environnementales à l'intérieur de l'environnement de la maison, leur détection avancée des fonctionnalités et de consommations peuvent donner une grande possibilité pour la gestion de l'énergie. En vertu de ce qui a été dit, l'idée d'un réseau plus intelligent, devient possible est réalisable. Malgré ces avantages, plusieurs régions dans les pays en voie de développement, l'électrification reste un grand défi. Par contre, ces mêmes régions isolées et

lointaines des réseaux nationaux, possèdent des potentiels énergétiques très importants, ce qui les rend intéressant et capable de supporter une installation des sources de production renouvelable ainsi que les dispositifs qui constituent les réseaux intelligents, formant une base vierge pour l'exploitation de ce qu'on appelle les micros smart grid.

Donc, notre travail qui a été réalisé au sein du laboratoire de modélisation des systèmes énergétiques (LMSE) à l'Université Mohamed Khider Biskra (UMKB), consiste en l'étude de la gestion de l'énergie d'un système hybride composé de trois source renouvelable, à savoir les panneaux solaires, les éolienne et les pile à combustible, avec deux différents dispositifs de stockage, les batteries et les supercondensateurs, pour une applications d'un micro smart grid.

Notre contribution dans ce travail réside dans le développement d'un mécanisme pour la gestion de l'énergie d'un système hybride composé de trois sources renouvelables avec deux différentes sources de stockage, un système qui peut être aussi utilisé dans les applications d'électrification des charges domestique dans les futurs réseaux intelligents, en se basant sur les notions de commande et l'écoulement de flux d'énergie.

## **Structure de la thèse**

Cette thèse est organisée en quatre chapitres.

Le premier chapitre traite les fondements théoriques des différentes sources renouvelables, ainsi que les systèmes de stockage et les accumulateurs chimiques. Des généralités sur les sources photovoltaïques et leurs différents modèles en passant par leurs caractéristiques, seront détaillées et une discussion sur la modélisation d'une cellule photovoltaïque est présentée. Ensuite une modélisation des différents types d'éoliennes est abordée. Puis, une discussion de la méthode de production d'énergie via une pile à combustible est dévoilée. Enfin, ce chapitre sera clôturé par la présentation de quelques modèles concernant deux dispositifs de stockage (accumulateurs chimiques et supercondensateurs) ainsi que leurs caractéristiques physiques.

Le deuxième chapitre a été consacré d'une part à la définition et l'analyse d'un smart grid, en donnant son concept, sa structure et les différentes technologies qui le constituent ; et d'autre part les différentes approches utilisées dans l'optimisation des systèmes hybrides destinés aux réseaux futur.

Afin d'étudier et vérifier la rentabilité des systèmes hybrides, le troisième chapitre, a été dédié à la proposition d'une méthodologie d'une conception du dimensionnement optimal d'un système photovoltaïque-éolienne avec des batteries de stockage en utilisant les algorithmes génétiques comme approche d'optimisation. Enfin, et pour améliorer la fiabilité de notre système, une troisième source (pile à combustible) a été ajoutée.

Le dernier chapitre a été sujet à la modélisation et la commande des différentes sources et leurs convertisseurs associés; une stratégie de commande qui se base sur la notion de platitude avec les régulateurs de courants par mode glissant pour les cinq sources de notre système hybride a été présentée. Enfin les résultats de simulation sous l'environnement de Matlab/Simulink de la stratégie de commande pour la gestion du flux d'énergie seront donnés et discutés, puis validés par une expérimentation sur un banc d'essai à puissance réduite, au sein de notre laboratoire MSE.

Enfin, notre travail est clôturé par une conclusion générale résumant les quatre chapitres, avec la citation de quelques perspectives.

# Chapitre 1

## *Généralités sur les sources électriques hybrides*

## 1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre nous allons présenter brièvement l'analyse et le principe de fonctionnement des différents types de sources électriques d'un système hybride. Nous analyserons aussi leurs caractéristiques physiques et électrique, leurs limitations et modèles, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Enfin, les différents composants constituant ces sources, feront partie de notre intérêt.

Dans ce travail, les éléments fondamentaux qui constituent notre système hybride sont: les générateurs solaires, les piles à combustible, les générateurs éoliens, les batteries et les supercondensateurs.

## 1.2 Générateur photovoltaïque (GP)

Les composants optoélectronique ou "cellules photovoltaïques" sont considérés comme les éléments de base d'un générateur photovoltaïque qui a la faculté de transformer les rayons solaires en énergie électrique.



Figure 1-1 Générateur photovoltaïque constitué de plusieurs panneaux solaires

Le domaine de fabrication des composants de cellules photovoltaïques est en plein essor, ce qui a entraîné l'apparition de plusieurs centrales de production d'électricité à base de panneaux solaires.

### 1.2.1 Les différents types de panneaux solaires

Il y a trois générations des panneaux solaire, la première génération, concerne les cellules en silicium cristallin, qui sont relativement condensées dont le rendement est de 12%. Ces cellules, souvent en silicium, ne contiennent qu'une seule jonction "p-n".

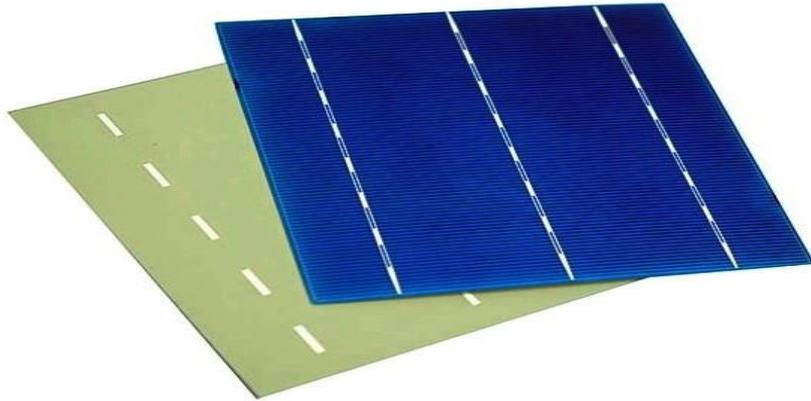


Figure 1-2 Cellules solaire en silicium cristallin

Les cellules polycristallines sont raffinées à partir d'une masse de silicium cristallisé en configuration des cristaux multiples. Vue de près, on peut remarquer les positions différentes des cristaux ce qu'on appelle une tonalité différentes.

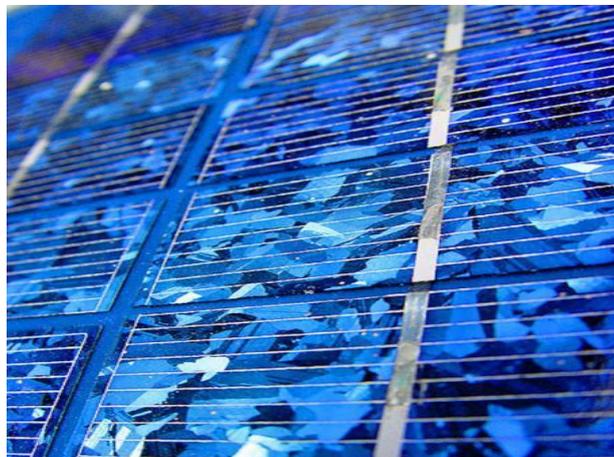


Figure 1-3 Cellules solaires polycristallines

Leurs rendements atteignent 11 à 15 %, avec une puissance de 110 à 150 Wc par m<sup>2</sup>. Ces cellules restent les plus employées grâce au bon rapport "performance/prix". Son majeur inconvénient réside dans la diminution de l'éclairement, qui entraîne automatiquement une chute de rendement

Les cellules monocristallines: Ces cellules sont formées de cristaux très purs parvenus par un contrôle progressif du refroidissement du silicium. Le rendement de ce type présente son avantage majeur, où, nous pouvons avoir 12-19 % avec une puissance entre 120 à 190 Wc par m<sup>2</sup>. En revanche, l'inconvénient majeur de ces cellules c'est son coût élevé et la diminution de son rendement lors de la diminution des éclaircements.

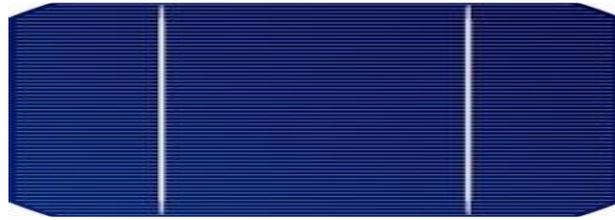


Figure 1-4 Cellules solaires monocristallines

Dans la deuxième génération, qui est à base de couches minces, le semi-conducteur est directement posé par évaporation sur une matière support. Le silicium amorphe, silicium non cristallisé de couleur grise foncée, le tellure de cadmium, le diséléniure de cuivre indium font notamment partie de cette génération[1]. Technologie retrouvée dans les montres et calculatrices.



Figure 1-5 Cellules solaires en couches minces

La troisième génération est une amélioration de la première et deuxième génération; son rendement est de 30 %.

### 1.2.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

La figure 1-6 montre la caractéristique typique courant-tension d'une cellule solaire.  $V_{oc}$  et  $I_{sc}$  sont respectivement la tension du circuit ouvert et le courant de court-circuit de la cellule photovoltaïque. Sur cette figure nous mentionnons le point qui convient à la puissance maximale  $P_{max}$  et qui nous permet de décrire les valeurs maximales  $V_{max}$  et  $I_{max}$  correspondant au point recherché par les algorithmes MPPT (maximum power point tracking).

On s'intéresse dans ce travail aux panneaux solaires de type Sunpower210W et ALPV85W. La caractérisation d'une cellule qui constitue un module de type Sunpower210W est représentée dans la figure ci-dessous.

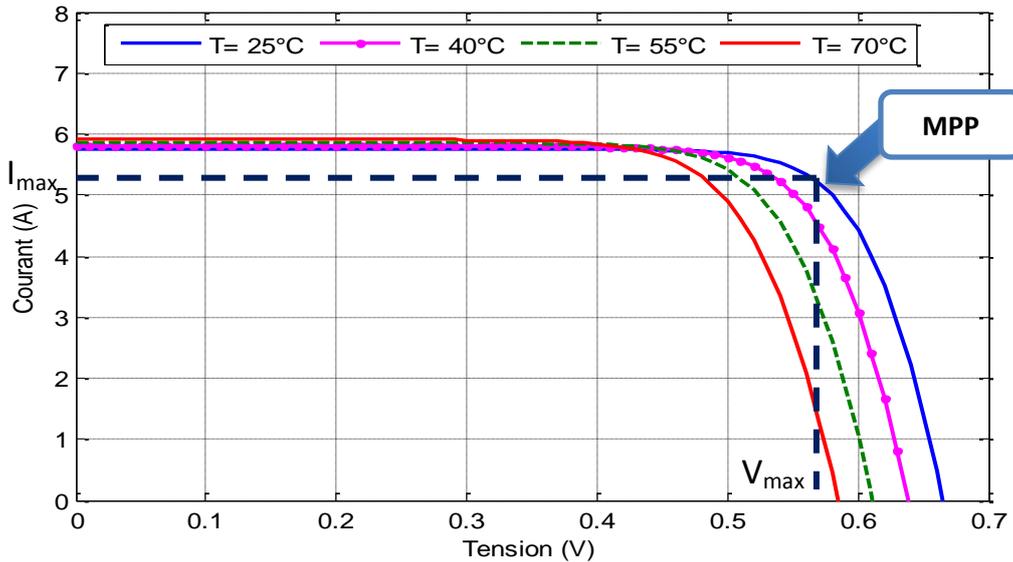


Figure 1-6 Caractéristique I-V de cellule solaire type "Sunpower210W"

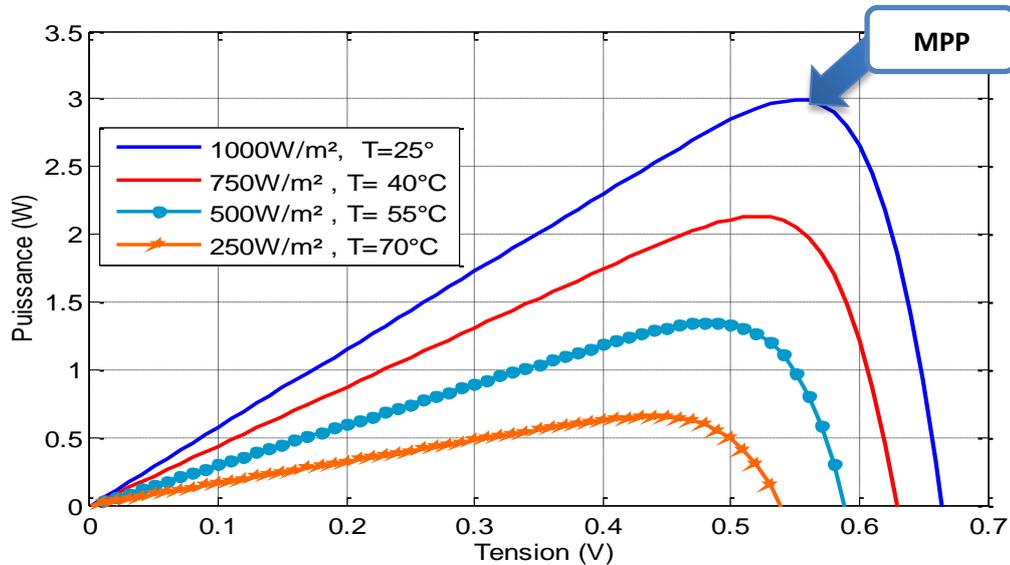


Figure 1-7 Caractéristique P-V de cellule solaire type "Sunpower210W"

Les figures 1-6 et 1-7 montrent que les conditions de température et d'éclairement de la cellule "sunpowerA300" modifient cette caractéristique et ainsi que les termes  $V_{max}$  et  $I_{max}$  déterminés sur les figures précédentes. La nature irrégulière de l'énergie solaire et les conditions climatiques et l'appel de charge, provoque une complexité dans la tâche d'optimisation de fonctionnement du système photovoltaïque [2]. C'est pour cette raison que l'on doit ajouter un algorithme d'ajustement qui contrôle via une stratégie de traque en temps réel du point de fonctionnement à puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking).

### 1.2.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La figure 1-8 illustre le modèle d'une cellule photovoltaïque, où  $I_{cc}$  représente le photocourant créé par la cellule solaire. Il est proportionnel à l'éclairement reçu et opposé au courant de la diode équivalente.  $R_s$  est la résistance série.  $R_p$  est la résistance parallèle.

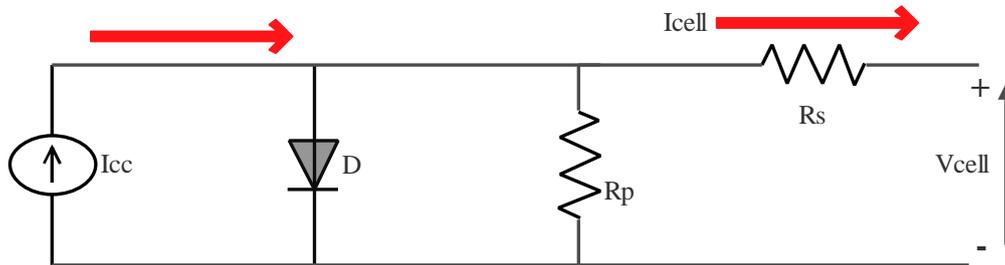


Figure 1-8 Modèle équivalent d'une cellule solaire

On note que la jonction P-N soumise à des rayonnements solaire peut être décrite par la figure précédente [3]. l'équation de la diode est donnée par [4, 5]:

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1.1)$$

Et on obtient sous éclairement comme courant de sortie:

$$I_{cell} = I_{cc} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

$I_s$ : le courant de saturation inverse de la diode.

$Q$ : la charge de l'électron= $1.6 \cdot 10^{-19}$ (C)

$K$ : le constant de Boltzmann= $1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K).

$n$ : le facteur de non idéalité de la photopile ( $1 < n < 2$ ).

$T$ : la température de la jonction en K

$I_d$ : le courant circulant dans la diode

$V$ : la tension de sortie.

Pour une charge qui tend vers l'infini, la tension de cellule tendra vers  $V_{co}$  qui est la tension en circuit ouvert. On prend les résistances de contacts et les pertes ohmiques en considération afin de simuler le cas réel, donc nous ajoutons au schéma équivalent une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance parallèle ( $R_p$ ), le modèle de la cellule devient[6]:

$$I_{\text{cell}} = I_{\text{cc}} - I_{\text{s}} \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right) - 1 \right] - I_{\text{p}} \quad (1.3)$$

$$I_{\text{p}} = \frac{V + R_s I}{R_{\text{p}}} \quad (1.4)$$

L'expression de la tension de la cellule peut être donnée comme suit [7]:

$$\begin{cases} -I_{\text{D}} + I_{\text{CC}} - \frac{V_{\text{D}}}{R_{\text{p}}} - I_{\text{PV}} = 0 \\ V_{\text{PVcell}} = V_{\text{D}} - R_{\text{s}} I_{\text{PV}} \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\begin{cases} V_{\text{PV}} = N_{\text{s}} V_{\text{PVcell}} \\ N_{\text{s}} \text{ c'est le nombre des cellules en series.} \end{cases} \quad (1.6)$$

#### 1.2.4 Avantages et inconvénients d'un générateur photovoltaïque

Dans un générateur photovoltaïque, on distingue les avantages suivants :

- Un GP est une source renouvelable qui prend sa matière primaire du soleil et ses rayonnements.
- Il a une grande fiabilité, avec un nombre limités des pièces auxiliaire mobiles.
- Un taux de pollution nulle, sachant que les panneaux solaire transforment l'énergie solaire en énergie électrique sans aucune pollution.
- Il ne nécessite pas un grand entretien, ce qui nous donne un coût relativement faible.
- Son caractère modulaire permet un montage simple et flexible.

Les inconvénients sont:

- Un GP est une source renouvelable qui dépend des conditions climatiques météorologiques.
- Un GP est souvent complété par un dispositif de stockage, donc une augmentation du coût.
- Pour une utilisation autonome, ces systèmes nécessite par fois un champ des panneaux énorme présente une grande taille d'installation.

### 1.3 Les éoliennes

L'énergie éolienne a été utilisée depuis longtemps. Le premier système de vent était employé par l'ancienne Perse sur des applications de grain moulu et d'eau pompée. Cette énergie qui est non polluante, renouvelable et disponible en quantité abondante sur toute la

surface de la planète. Au cours des dernières années, l'exploitation de l'énergie éolienne est devenu parmi les principales sources d'électricité renouvelables avec plus de 369,597MW produits dans le monde à la fin de 2014[8].

### 1.3.1 La production mondiale

La figure suivante montre l'énergie éolienne installée dans le monde à la fin de l'année 2014. Ces statistiques sont puisées dans la source GWEC (Global Wind Energy Council).

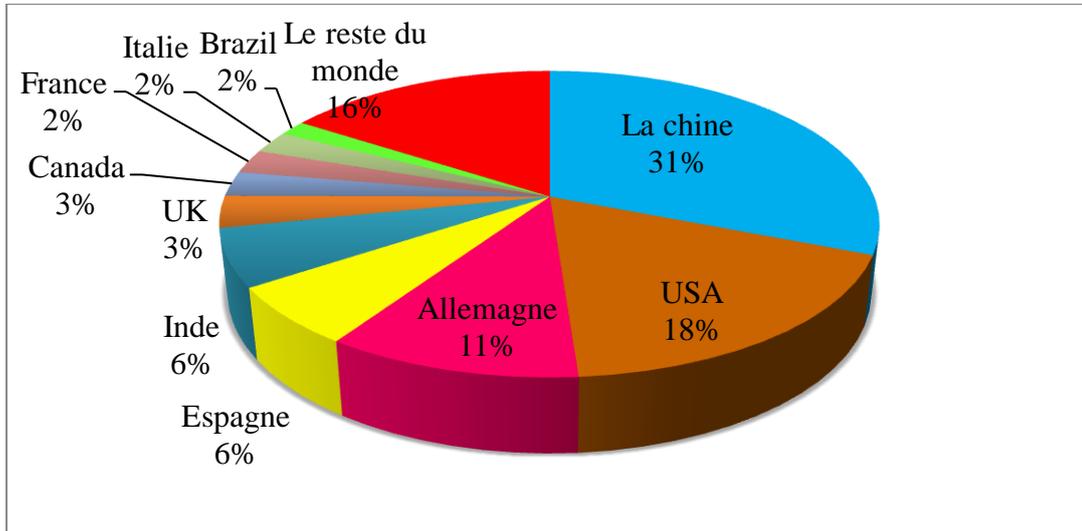


Figure 1-9 Production mondiale de l'énergie éolienne en 2014.

En utilisant des génératrices éoliennes afin de transformer le vent en électricité pour couvrir une large gamme de puissance selon les exigences et le type de génération choisi. Ainsi par exemple, les éoliennes offshore peuvent être placées sur des dizaines de mètres de hauteur pour générer plusieurs MW. Par ailleurs, d'autres types leur hauteur ne dépassent pas la dizaine de mètres et sont destinés à l'usage domestique ; souvent sont installés à proximité d'une maison ou d'un immeuble, afin de produire quelques centaines ou milliers de Watts [9]. L'intérêt pour l'énergie éolienne a été renouvelé dans les milieux des années 1970 à la suite des crises pétrolières et l'augmentation des inquiétudes sur la conservation des ressources [10]. Dans les régions isolées et les systèmes autonomes, on utilise généralement des turbines de petite taille moins de 100 kW. Les génératrices éoliennes via le développement "offshore" a débuté dans les années 1990 [11].

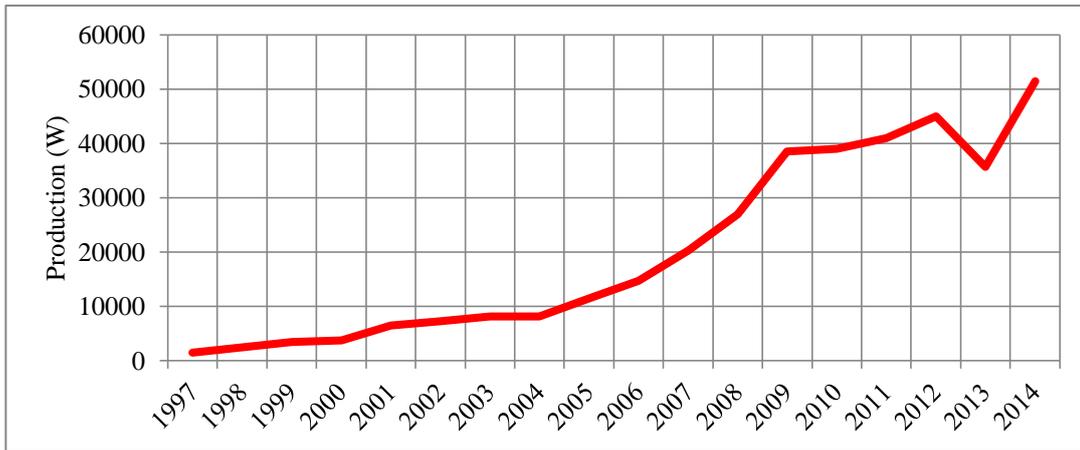


Figure 1-10 Production mondiale de l'énergie éolienne pour les années 1997-2014.

La figure 1-10 montre la production mondiale de l'énergie éolienne, où nous observons la progression d'exploitation de cette ressource. Ces données sont obtenues à partir de GWEC.

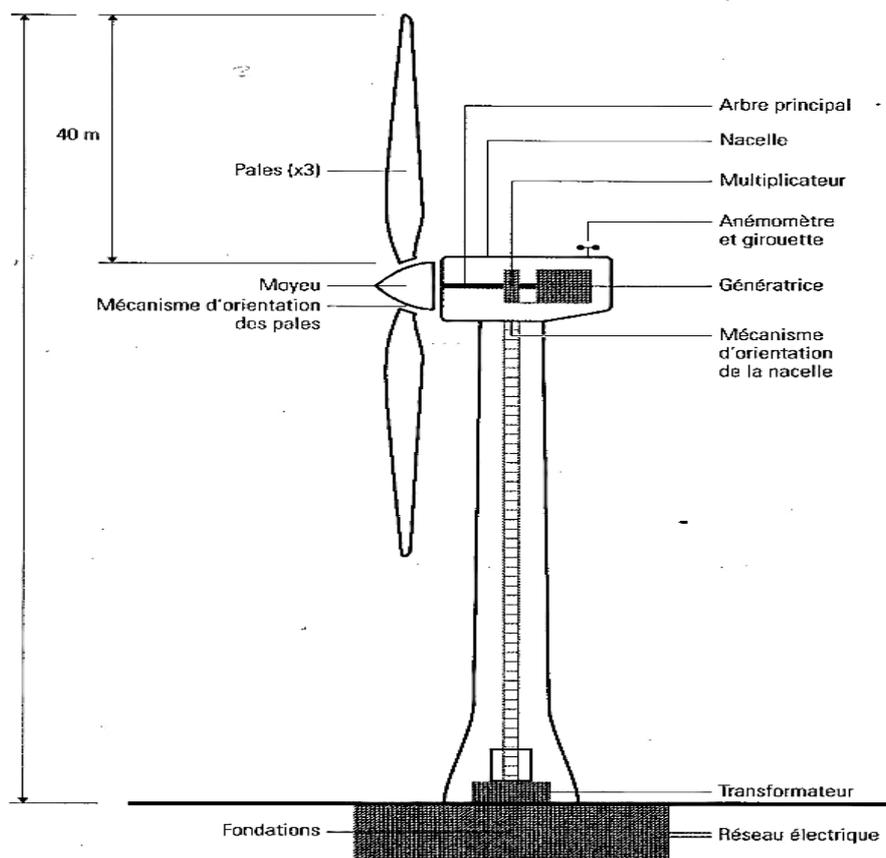


Figure 1-11 Schéma d'une génératrice éolienne.

### 1.3.2 Les différents types de génératrices éoliennes

Une grande variété de technologies d'éoliennes est en usage aujourd'hui. Leurs technologies varient en coût, complexité, efficacité de l'extraction de l'énergie éolienne et les équipements utilisés [12]. Un résumé de ces technologies est présenté dans [13] et [14].

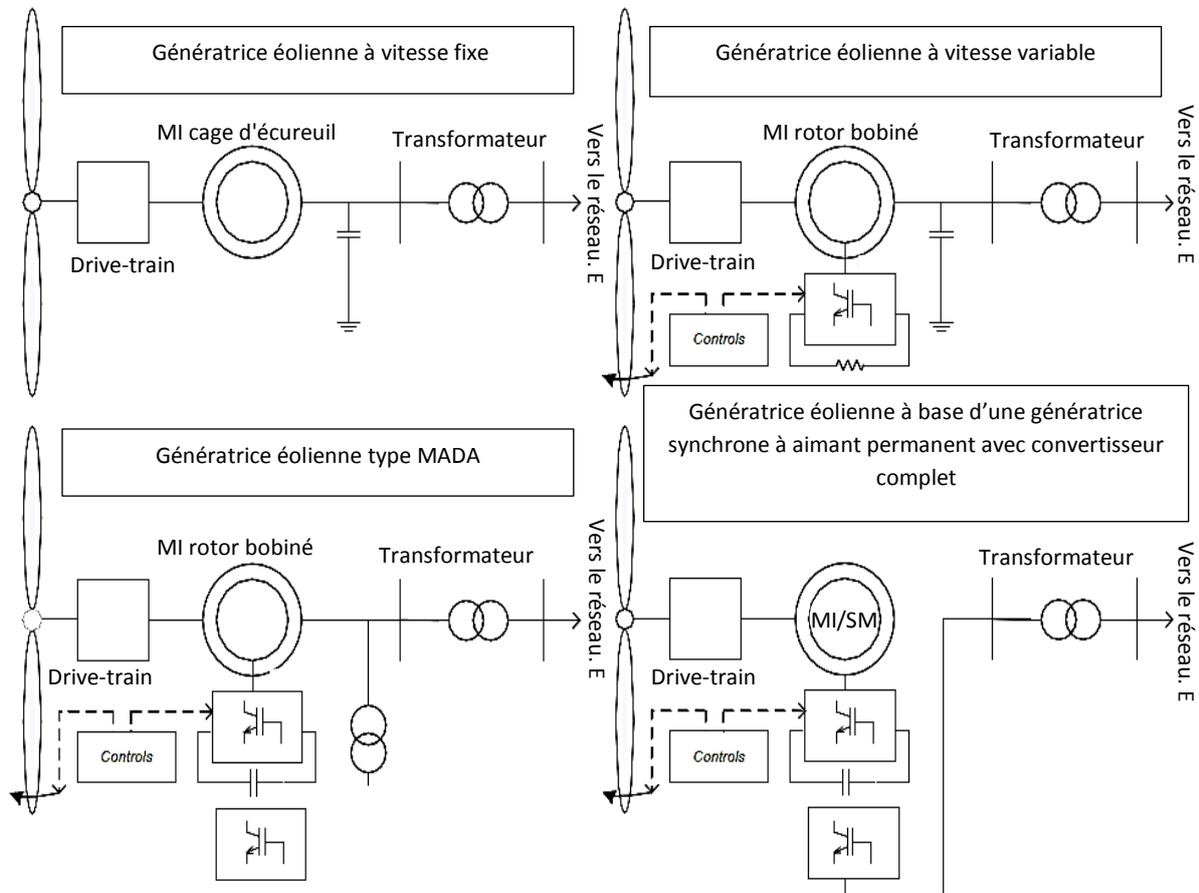


Figure 1-12 Schéma représente les différentes génératrices éoliennes[12].

Dans [12, 15, 16], les éoliennes ont été classées en quatre catégories principales :

#### 1.3.2.1 Eoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les turbines les plus simples en fonctionnement avec un très peu de variation dans la vitesse du rotor de la turbine, et emploient des machines à cage d'écureuil directement raccordés au réseau. C'est turbines sont relativement robuste et fiable, cependant il y a aussi des inconvénients importants de ce type, à savoir la capture de l'énergie du vent est sous-optimale et une compensation de puissance réactive est nécessaire.

### ***1.3.2.2 Eolienne à base de génératrice synchrone à aimant permanent avec convertisseur complet***

Ces turbines peuvent contenir des générateurs synchrones ou asynchrones et offrir un contrôle de puissance active et réactive indépendant. Elles sont équipées de convertisseur AC / DC / AC afin d'alimenter les réseaux électrique, sachant qu'il n'y a aucune connexion directe au réseau.

### ***1.3.2.3 Eolienne type « MADA »***

Elle est équipée d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA); elle utilise généralement un convertisseur AC / DC / AC dans le circuit du rotor. Le vecteur de contrôle du flux des courants de rotor permet le découplage des puissances de sortie réelle et réactive, ainsi que l'extraction de l'énergie maximale et la diminution des contraintes mécaniques.

### ***1.3.2.4 Eolienne à vitesse variable***

La catégorie des éoliennes à vitesse variable représente le type le plus prisé. Elles sont conçues pour fonctionner à une large gamme de vitesses de rotor. Le contrôle de vitesse et de puissance permettent à ces turbines d'extraire plus d'énergie à partir d'un régime de vent donné par rapport à la turbine à vitesse fixe.

## **1.3.3 Production d'énergie électrique par éolienne**

Un système de conversion d'énergie éolienne est un système complexe dans lequel la connaissance d'un large éventail de domaines comprenant l'aérodynamique, mécanique, génie civil et électrique est nécessaire. Les principaux composants d'une éolienne moderne sont la tour, le rotor et la nacelle, qui contient les mécanismes de transmission et le générateur. L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent dans le rotor constitué de deux ou plusieurs pales couplées mécaniquement à un générateur électrique.

On s'intéresse dans ce travail à la génératrice de la marque " FutureEnergy-10kW" et "FutureEnergy-1kW". Dans cette section nous allons présenter la caractéristique de l'éolienne FUTUREENERGY de 1kW employée dans notre système hybride simulé et discuté dans le quatrième chapitre.

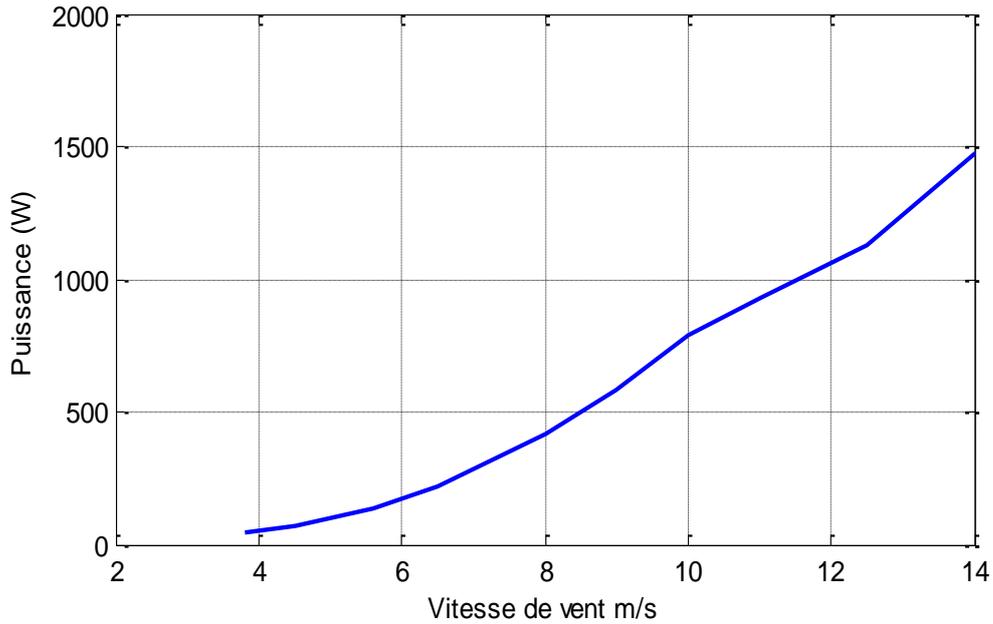


Figure 1-13 Caractéristique (vitesse de vent-puissance) d'une éolienne FUTUREENERGY-1kW

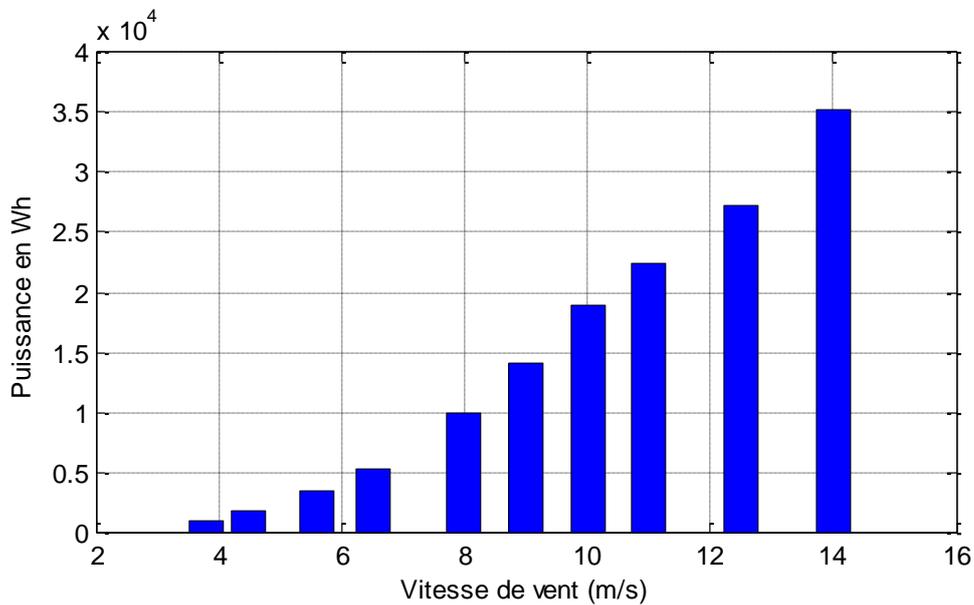


Figure 1-14 Caractéristique (vitesse de vent-production journalière) d'une éolienne FUTUREENERGY-1kW

Les entrées et sorties d'une éolienne peuvent être déterminées par les points suivants [17]:

- La quantité de la vitesse du vent, détermine l'énergie d'entrée de l'éolienne.
- Grandeurs paramétrique d'entrée de la machine par exemple, les différentes configurations comme axe horizontal ou axe vertical turbines...etc.).
- La vitesse de la turbine, surface balayée par les pales, inclinaison, et l'angle du rotor.

- Grandeurs de sortie de la turbine, à savoir la puissance ou le couple, qui peuvent être contrôlés en faisant varier les trois grandeurs d'entrée citées précédemment.

La relation entre la puissance et la vitesse du vent est calculée comme suit [18]:

L'énergie cinétique d'une masse de l'air "m" en mouvement avec la vitesse "V" est donnée par ce qui suit:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (1.7)$$

La puissance éolienne disponible sur le site, qui peut être récupérée théoriquement par unité de surface, est donnée par:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot S \cdot V^2 \quad (1.8)$$

P: la puissance récupérée en Watt.

$\alpha$ : la masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\beta$ : le débit volumique d'air ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

S: la surface du dispositif de récupération ( $\text{m}^2$ ).

V: la vitesse de l'air traversant le dispositif ( $\text{m/s}$ ).

L'éolienne a pour rôle de récupérer l'énergie cinétique du vent, par ailleurs, la turbine elle-même représente un freinage pour le vent balayant les pales avant qu'il soit complètement récupérer comme énergie. Selon la loi de l'Allemand Albert Betz, démontré en 1919, une éolienne ne pourra donc jamais recouvrir l'énergie complète produite par le vent. Lorsque l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par le rotor, le vent est freiné par celui-ci, la vitesse du vent en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval.

La loi de Betz, décrit la puissance maximale récupérable:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_{\text{cinétique}} \quad (1.9)$$

Avec 
$$P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \cdot a \cdot b \cdot c^3 \quad (1.10)$$

Tel que: "a" est la masse volumique de l'air atmosphérique sec à 15°C et à pression atmosphérique 1,0132 bar, "b" est la surface du capteur éolien exprimé en m<sup>2</sup> et "c" est la vitesse incidente de l'air atmosphérique exprimé en m/s.

On détermine généralement les changements du vent sur une région bien définie en utilisant la distribution de Weibull. Cette distribution est une fonction qui représente les variations de la vitesse du vent et nous permet d'optimiser la conception des systèmes éoliens. Par ailleurs, le coefficient de Weibull définie la distribution des vitesses du vent.

La fonction de densité de probabilité de la vitesse du vent est donnée comme suit[19]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \times e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} \quad (1.11)$$

La fonction de probabilité de densité de Weibull sert à reproduire la probabilité de vitesse du vent entre deux points. Deux constantes sont essentielles à déterminer, il s'agit des paramètres "k" et "c" de Weibull, qui représente respectivement le facteur de forme de la distribution dont la valeur est entre 1 et 3 et le facteur d'échelle (en m/s), qui est proportionnel à la vitesse moyenne du vent, permet de formuler la chronologie d'une vitesse caractéristique. La figure ci-dessous montre une distribution de Weibull pour le site de Biskra au sud de l'Algérie.

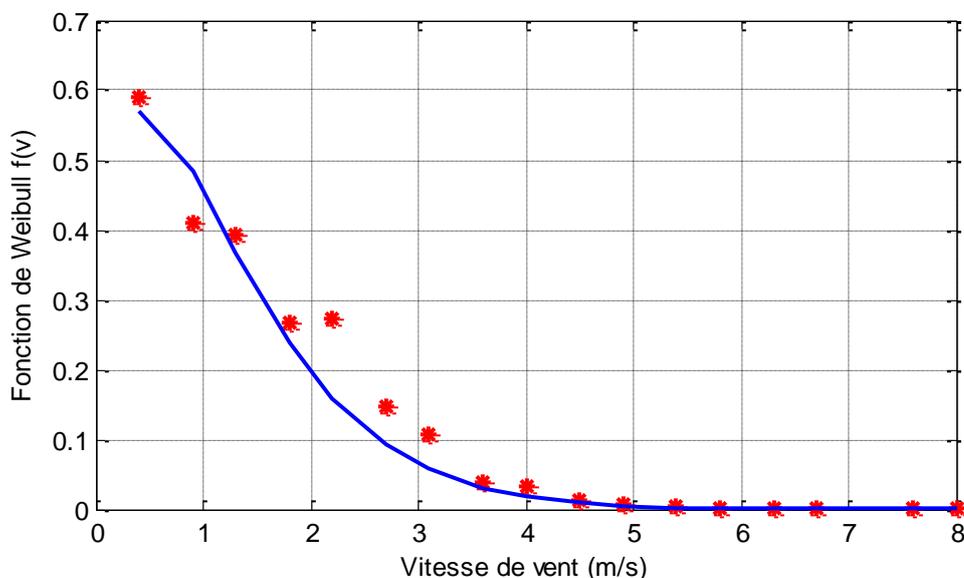


Figure 1-15 Fonction de Weibull: probabilité de distribution de vitesse de vent (site: Biskra-Sud d'Algérie).

## 1.4 La pile à combustible

Par définition, la pile à combustible (fuel cell) FC produit l'électricité à partir d'une réaction chimique due au passage d'un gaz riche en hydrogène à travers une anode et d'oxygène (ou d'air) à travers une cathode avec un électrolyte entre l'anode et la cathode qui permet l'échange des charges électriques (ions). Le flux d'ions à travers l'électrolyte produit un courant électrique dans un circuit externe vers une charge.

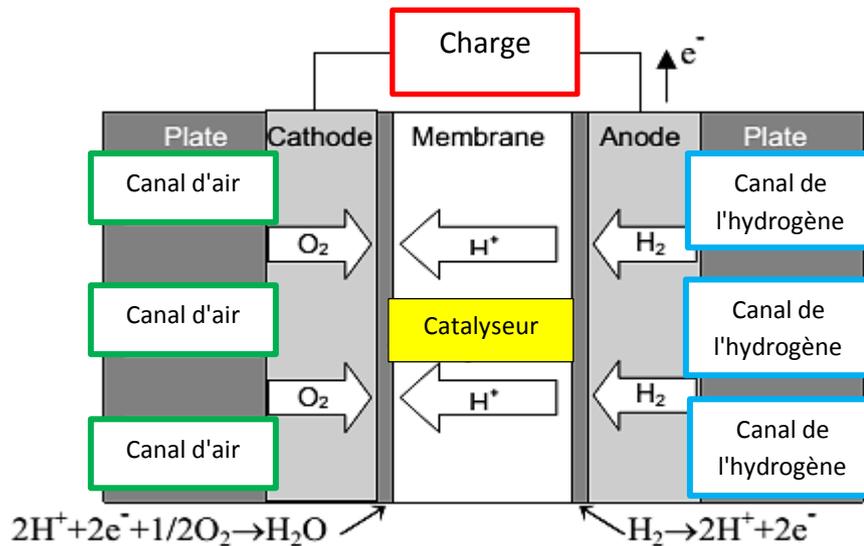


Figure 1-16 Principe de Fonctionnement d'une pile à combustible

### 1.4.1 Les différents types de la pile à combustible

Dans cette section, nous allons voir le critère de classification de la pile à combustible, suivie d'une description brièvement détaillée de chaque type. Dans le tableau 1.1, nous donnons une classification des types de piles à combustibles d'hydrogène qui sont actuellement en cours d'utilisation et de développement.

Les piles à combustible sont généralement classées en fonction de l'électrolyte utilisée, avec une exception dans la pile à méthanol, dans laquelle, le méthanol est directement injecté à l'anode au cours de la réaction.

Les piles à combustible peuvent également être classées à base de température de fonctionnement, les piles à combustible alcalines, Polymère, Pile à combustible à membrane échangeuse. La pile à combustible à méthanol direct injecté comme carburant et les piles employant l'acide phosphorique ont une faible température de fonctionnement, généralement

inférieure à 220 ° C. Par ailleurs, il y a d'autres types comme les piles à combustible à solide oxyde qui fonctionnent à haute température d'environ 600-1000 ° C [20].

Tableau 1.1 Classification de la pile à combustible

Type de pile	Polymer Membrane FC	Direct Methanol FC	Phosphoric Acid FC	Alkaline FC	Molten Carbonate FC	Solid Oxide FC
Température	50-100°C	60-90°C	150-200°C	90-100°C	600-700°C	600-1000°C
Electrolyte	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Solution KOH	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> et KCO <sub>3</sub> fondu dans une matrice LiAlO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> et Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Puissance de sortie	1-250kW	1-100kW	50kW-1MW	10-100kW	1kW-1MW	1kW-3MW
Combustible	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	Méthanol	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)
Oxydant	Air	Air	Air	O <sub>2</sub> (pur)	Air	Air
Domaines d'application	Automobiles, Portable, Cogénération	Les petits portables	Centrale de production	Militaire Spatial	Centrale de production électrique	Centrale de production. Automobile (APU)
Rendement	53-58%	25-35%	>40%	60%	45-47%	35-43%

#### 1.4.1.1 La pile à membrane polymère (PEMFC)

La PEMFC est un type de pile à combustible avec une température de fonctionnement dans la gamme de 50° à 100°C. Le fonctionnement à basse température délivre une densité de courant et de puissance élevée. Cela permet à la cellule d'avoir un design compact, poids léger et temps de réponse rapide par rapport aux autres piles à combustible [21].

Comme son nom l'indique, ce type utilise un électrolyte en membrane échangeuse de protons solide. La membrane conductrice des protons est une composante importante de la pile à combustible. L'utilisation d'un électrolyte solide a ses avantages. L'imperméabilité des gaz d'anode et de cathode devient plus facile, ce qui rend la fabrication de ce genre très économique. Contrairement aux électrolytes liquides, les électrolytes solides sont moins susceptibles à la corrosion qui permet au système d'avoir une durée de vie plus longue.

#### **1.4.1.2 Pile alcaline (AFC)**

Les piles alcalines sont des piles à combustible à basse température, les premiers prototypes ont été utilisés dans les missions spatiales Apollo [22]. La AFC utilise l'hydroxyde de potassium en tant qu'électrolyte et platine-cobalt, Platine-Palladium comme alliages des électrodes. L'hydroxyde de potassium a pour rôle d'accélérer la réduction de l'oxygène. La pile alcaline doit fonctionner avec un gaz pur, et de faibles concentrations de dioxyde de carbone, ce qui représente une contrainte d'exploitation majeure [23].

#### **1.4.1.3 Pile à acide phosphorique (PAFC)**

La pile à combustible en acide phosphorique est une pile à basse température dans une gamme de 150 à 200 °C. Principalement utilisée dans les centrales électriques fixes. La PAFC est parmi les premiers FC commercialisés dans le monde avec une capacité installée de 75 MW [24]. Ces piles sont attendues à trouver une position dans le marché des applications d'environ 1 MW car ils sont très fiables et peuvent être utilisés pour la cogénération [20]. Il existe déjà des centrales électriques installées dans le monde et qui fournissent des puissances entre 5 et 20 MW. L'électrolyte de ce type est l'acide phosphorique sous forme liquide. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone [23].

#### **1.4.1.4 Pile à méthanol direct (DMFC)**

Ce type est dérivé de la pile à membrane électrolytique en polymère, et sont généralement utilisés pour de petites applications portables ayant une faible température d'exploitation. Le méthanol est directement introduit dans l'anode dans ces piles à combustible. Ceci élimine le besoin pour un reformeur pour convertir le combustible à hydrogène. Cela rend le DMFC une pile très prometteuse pour les sources d'énergie portables, les véhicules électriques et les applications de transport [25], son fonctionnement est similaire à celle de la PEMFC.

#### **1.4.1.5 Pile à oxyde solide (SOFC)**

La SOFC possède une caractéristique lui permettant de fonctionner dans les hautes températures, ce qui rend ce type de pile convenable pour l'application centralisée et pour la cogénération pour des gammes de 1kW jusqu'à 3-4 MW. Une SOFC est constituée de quatre couches superposées avec une épaisseur très fine de quelques millimètres et une très haute température (600-1000°C). Le principe de fonctionnement des SOFC est basé sur le mécanisme de dissociation de l'oxygène à la cathode en O<sub>2</sub>, puis le cation migre à travers

l'électrolyte conducteur ionique à haute température (800 °C) et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène pour former de l'eau et libérer des électrons. La haute température des piles SOFC présente un double avantage, elle permet l'utilisation directe d'hydrocarbures de gaz naturel et elle assure d'autre part la fourniture d'une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération avec ou sans turbine à gaz [26].



Figure 1-17 Prototype de pile SOFC réalisé au centre de recherches de Jülich en Allemagne [26].

#### 1.4.2 Caractéristique et modélisation des piles à combustible

La caractéristique statique de la pile à combustible est donnée par la figure 1-18. La caractéristique d'une pile PEM est souvent définie par: la tension théorique à vide "E", la surtension d'activation  $V_{act}$ , la surtension ohmique  $V_{ohm}$  et la surtension de concentration  $V_{conc}$ . La tension de sortie d'une seule cellule peut être définie comme suit [27, 28]:

$$V_{pile} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (1.12)$$

E est la potentielle thermodynamique de la cellule et représente sa tension réversible;  $V_{act}$  est la chute de tension due aux pertes d'activation de l'anode et la cathode,.

On peut exprimer la tension d'activation en relation avec la densité du courant  $I_{fc}$  délivré par la pile par l'équation suivante:

$$V_{act} = A \log \left( \frac{i_{fc} - i_n}{i_0} \right) \quad (1.13)$$

- $i_0$  : Le courant d'échange définissant à vide les échanges électrode-électrolyte.
- $i_n$  : Le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte.
- $A$  : La pente de la droite de "Tafel".

$V_{ohm}$  est la chute de tension ohmique, elle est due aux résistances de la conduction des protons à travers de l'électrolyte.

On peut l'exprimer par la formule suivante:

$$V_{ohm} = R_m (i_{fc} - i_n) \quad (1.14)$$

Tel que:  $R_m$  est la résistance totale de la pile à combustible.

Tel que:  $R_m$  est la résistance totale de la pile à combustible.

$V_{con}$  : est la chute de tension provenant de la réduction de la concentration des gaz lors de la réaction chimique.

Elle est régit par l'équation suivante:

$$V_{con} = B \log \left( 1 - \frac{i_{FC} - i_n}{i_{Lim}} \right) \quad (1.15)$$

- $B$  : Constante de transport ou de transfert de masse.
- $I_{FC}$  : Densité du courant de fonctionnement permanent ( $A/cm^2$ ).
- $I_{Lim}$  : Densité du courant limite.

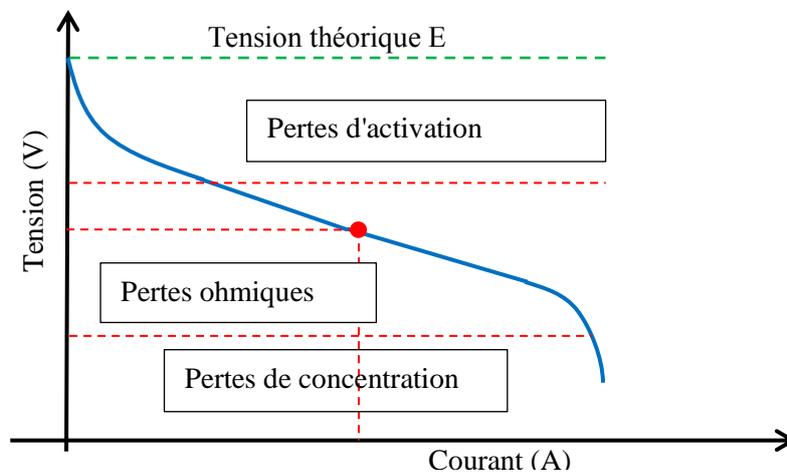


Figure 1-18 Caractéristique idéale d'une pile à combustible

Pour une pile à combustible, plusieurs modèles ont été développés pour approuver et analyser la performance, le comportement et la conception selon l'objectif recherché. Il existe trois principaux modèles statiques, qui décrivent la courbe de polarisation d'un stack PEM, à savoir : le modèle statique de Larminie et Dicks [29], le modèle d'Amphlett et al [30] et le modèle de Chamberlin-kim [31]. Nous allons choisir le modèle statique le plus simple, afin de simuler notre pile, pour cela, nous allons utiliser un modèle de 500W développé dans le laboratoire le GREEN de Nancy en France.

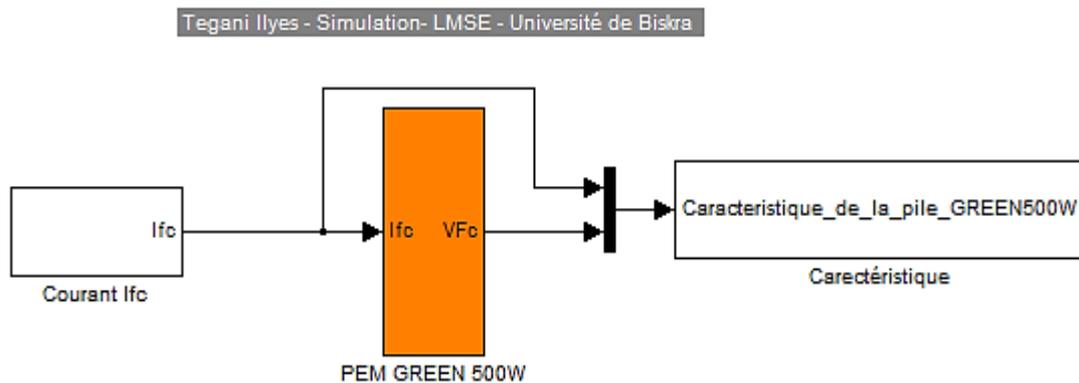


Figure 1-19 Modèle de la pile PEMFC GREEN 500W simulé sous Matlab-Simulink

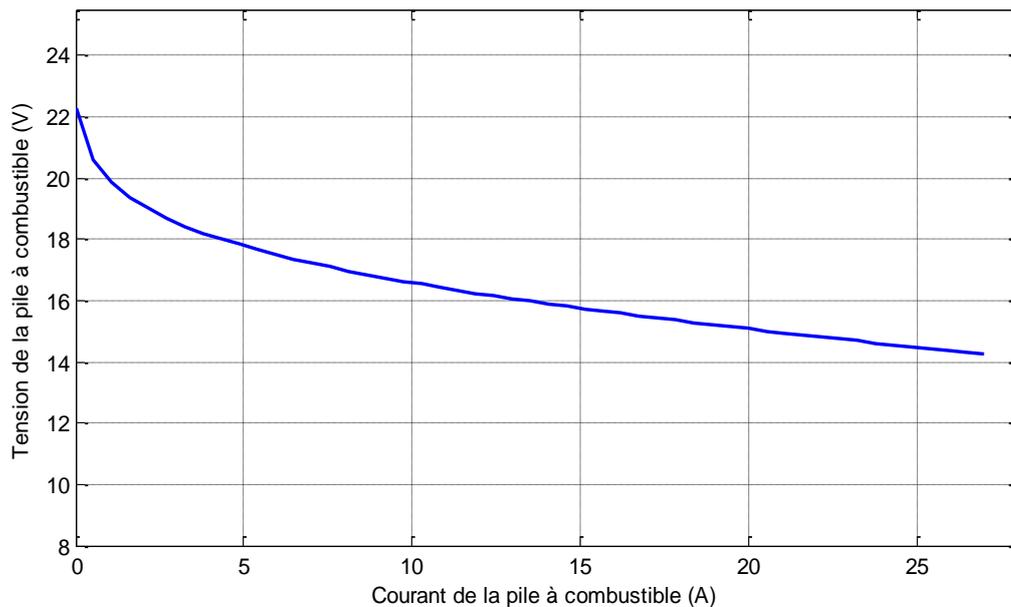


Figure 1-20 Caractéristique Tension-courant de la pile PEMFC GREEN 500W

### 1.4.3 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

Dans ce qui suit et d'après les travaux de [2]:

#### 1.4.3.1 Les avantages

- Les piles à combustible PEMFC produisent de l'électricité en convertissant directement l'énergie chimique en énergie électrique.
- Un rendement de conversion important ; grâce à la conversion directe de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique.
- Pas de bruit, ce qui les rend appropriés pour les applications domestique comme les écoles, les universités...etc.
- La taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.
- Les piles à combustibles PEMFC sont plus fiables par rapport à d'autres méthodes classiques parce qu'ils n'ont pas des vibrations mécaniques et des pièces en mouvement, par conséquent, il n'exige pas beaucoup de maintenances.

#### 1.4.3.2 Les inconvénients

- Le plus grand obstacle des piles à combustible est leurs coûts.
- Une durée de vie faible spécialement si on aura un courant délivré subit des variations importantes et répétées.

### 1.5 Batteries électrochimiques

Nommées aussi les "accumulateurs électriques", destinées à stocker l'énergie électrique. Aujourd'hui, jusqu'à ce jour, plusieurs véhicules utilisent encore le vieil accumulateur au plomb [32]. Toutefois, il existe d'autre type de batterie garantissant une autonomie de plus de 600 km, mais avec un prix excessivement important, sachant par ailleurs, que cette batterie ne peut pour l'instant être rechargée qu'une dizaine de fois: c'est la batterie Zinc – Argent [33].

Les accumulateurs existants possèdent différentes caractéristiques, afin de les différencier, on peut les partager selon la quantité d'énergie qu'elles peuvent stocker. Citons les plus utilisées, batteries:

- Au plomb.
- Ni-Cd.
- Ni-MH.

- Lithium-ion.

La quantité d'énergie peut être calculée par sa capacité  $Q$  généralement exprimée en Ah, en considérant que le courant fourni est constant. On quantifie aussi l'énergie emmagasinée en Wh.

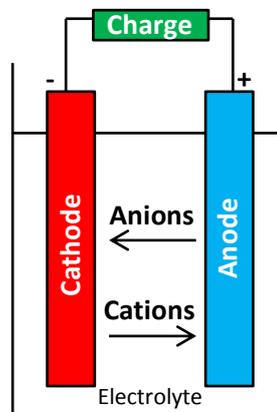


Figure 1-21 Une cellule typique d'une batterie électrochimique[34]

Une batterie est formée de cellules, la tension de la batterie est donc un multiple de la tension de ces cellules ; par exemple, sur une batterie au plomb de 24V possède 12 cellules de 2V. D'autre part, lors du choix d'un accumulateur on doit tenir compte essentiellement de la masse à embarquer et la capacité de stockage. Les batteries électrochimique se déchargent ordinairement au repos, jusqu'à 1 ou 0,5% par jour, suivant le type et la technologie.

### 1.5.1 Liaisons des batteries

Pour avoir une tension désirée, on peut généralement connecter les cellules de la batterie en série de sorte que leur tension augmente jusqu'à la valeur requise. Par exemple, une batterie de 6V peut être réalisée en connectant en série trois cellules lead-acid (au plomb) de 2.0V ou cinq cellules nickel-cadmium de 1.2V.

#### 1.5.1.1 Connexion en série

Si les batteries sont connectées « plus » à « moins » (positive d'une cellule à négatif de la cellule suivante), de sorte que leur tension atteint une valeur appropriée pour l'application demandée, elles sont dits «connectées en série». On note que le même courant va traverser toutes les cellules.

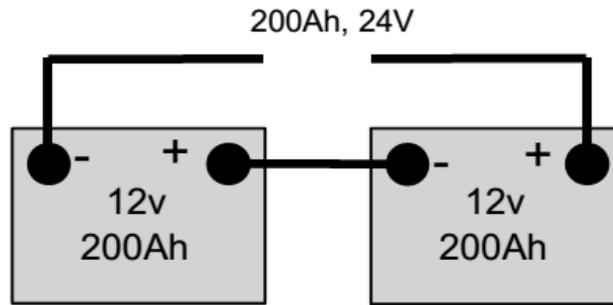


Figure 1-22 Liaison en série des batteries

### 1.5.1.2 Connexion parallèle

Si deux ou plusieurs batteries sont connecté « plus » à « plus » et « moins » à « moins » (positif d'une cellule à la borne positive de l'autre et de même pour les pôles négatifs) alors elles ont dit connectées en parallèle. Deux piles reliées en parallèle produiraient la même tension que d'une seule cellule, mais ils sont capables de délivrer deux fois le courant. Elles auraient aussi deux fois la capacité de stockage d'une seule cellule à la même tension.

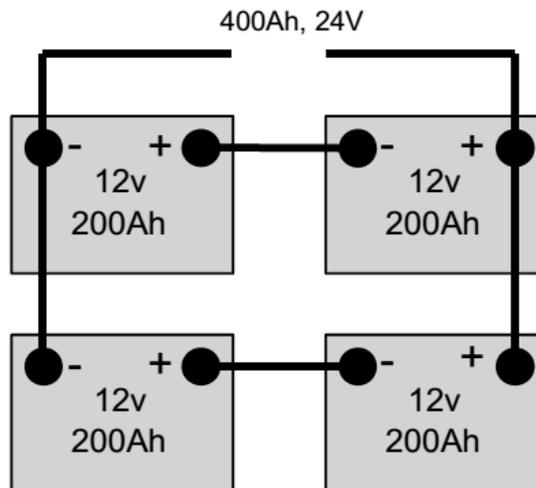


Figure 1-23 Liaison en série et en parallèle des batteries

### 1.5.2 Différent types des batteries électrochimique

Comme nous l'avons mentionné ultérieurement, on peut diviser les batteries selon différents types, dont les plus utilisées dans les systèmes hybrides sont celles réalisées sur la base de plomb, de lithium ou de nickel. Pour chacune de ces types, nous allons aborder leur principe, les technologies employées et nous allons comparer leurs principales propriétés.

### 1.5.2.1 Les batteries au Plomb

Les réactions chimiques qui se produisent dans une batterie au plomb sont représentées par les équations suivantes:

Tableau 1.2 Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb[2]

<i>Décharge</i>	<i>Charge</i>
<i>A la anode (+):</i> $PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \longrightarrow Pb^{++} + 2H_2O$	<i>A la anode (+):</i> $Pb^{++} + 2H_2O \longrightarrow PbO_2 + 4H^+ + 2e^-$
<i>A la cathode (-):</i> $Pb \longrightarrow Pb^{++} + 2e^-$	<i>A la cathode (-):</i> $Pb \longrightarrow Pb^{++} + 2e^-$
$2Pb^{++} + 2SO_4^{--} \longrightarrow 2PbSO_4$	$2PbSO_4 \longrightarrow 2Pb^{++} + 2SO_4^{--}$
$Pb + PbO_2 + 4H^+ + 2SO_4^{--} \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Décharg}} \\ \xleftarrow{\text{Charge}} \end{matrix} 2H_2O + 2PbSO_4$	

Cette batterie utilise l'oxydoréduction du plomb. Une cathode oxydée en  $PbO_2$  et réduite en  $PbSO_4$  et une anode oxydée en  $PbSO_4$  et réduite en  $Pb$  [2].

Une batterie au plomb est composée de plusieurs cellules, qui leurs nombre déterminent la valeur de sa tension. Une cellule de batterie est une association d'électrodes positives et négatives immergeant dans l'électrolyte. L'ensemble a une différence de potentiel entre ses bornes d'environ 2 Volts.

L'électrode positive est formée d'oxyde de plomb et l'électrode négative de plomb. L'électrolyte, dont la fonction est de garantir le transfert des ions entre les deux bornes (anode-cathodes) pendant la réaction chimique.

### 1.5.2.2 Les batteries Nickel-Cadmium et Nickel-Hydrure Métallique

On distingue deux types de batteries qui correspondent à deux couples électrolytiques différents:

- le Nickel-Cadmium (Ni-Cd),
- le Nickel-Hydrure Métallique (Ni-MH).

Ces deux types de batteries sont les plus efficaces dans les applications mobiles et portatives. Les batteries Ni-MH équipent aussi les voitures hybrides telles que la Toyota Prius. Ces dernières sont conçues de telle sorte qu'elles peuvent couvrir toute une durée de vie d'une voiture [35].

### 1.5.2.3 Batteries Lithium-Ion (Li-ion)

Composées de cellules qui emploient des composants d'intercalation en lithium comme des bornes positifs et négatifs, qui dans leurs cycles, les ions de lithium s'échange entre les électrodes positive et négative.

Le matériau d'électrode positive est typiquement un oxyde de métal avec une structure en couches, tel que l'oxyde de lithium et de cobalt ( $\text{LiCoO}_2$ ), ou d'un matériau avec une structure en tunnel, tel que l'oxyde de manganèse de lithium ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), sur un collecteur de courant par feuille d'aluminium. Le matériau d'électrode négative est typiquement un carbone graphitique, également un matériau stratifié, sur un collecteur de courant en cuivre [34, 36].

### 1.5.3 Modélisation des batteries

En littératures, il existe plusieurs types de modèles, dont chacun est lié au type de la batterie. Dans notre cas, il s'agit d'une batterie au plomb.

#### 1.5.3.1 Modèle d'une batterie au plomb

Le modèle représenté sur la figure 1-24, il est constitué d'une source de tension correspondant à la tension du circuit ouvert  $E_0$ , en série avec une capacité  $C_b$  modélisant la capacité interne de la batterie et une résistance  $R_s$ .

La résistance  $R_s$  est composée d'une résistance interne  $R_{\text{int}}$  et d'une résistance ohmique  $R_{\text{ohm}}$ , de valeur constante et correspondant à la résistance des conducteurs[37].

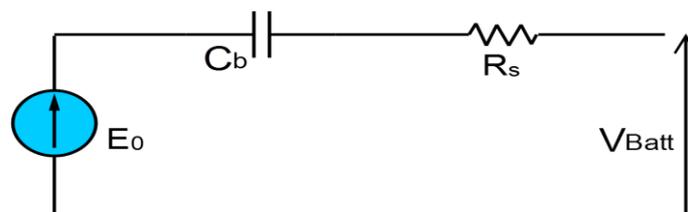


Figure 1-24 Modèle R-C d'une batterie au plomb[7].

L'équation modélisant la batterie au plomb peut être donnée comme suit:

$$V_{\text{Batt}} = E_0 - V_{\text{cb}} - R_{\text{Batt}} I_{\text{Batt}} \quad (1.16)$$

Les batteries sont définies par une capacité exprimée en ampères-heures(Ah). Cette valeur est définie comme l'énergie délivrée lorsque la batterie passe d'un état de charge à un état où la tension à ses bornes chute brutalement, tension dite de "cut-off " (figure1-25) [2].

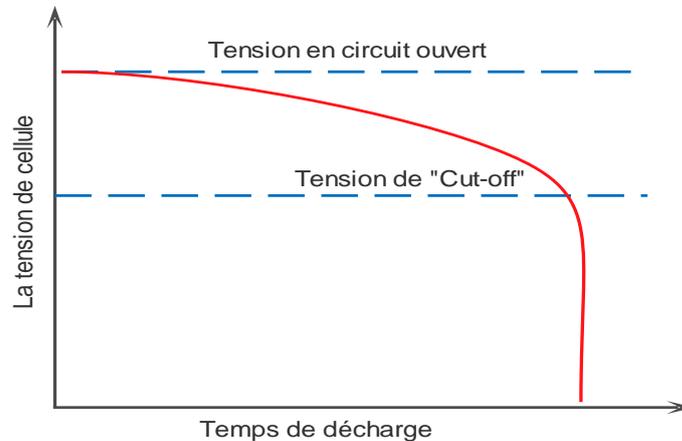


Figure 1-25 Caractéristique d'une batterie avec tension de "cut-off"[38]

## 1.6 Les Supercondensateurs

Le principe de la double couche électrique est né avec le physicien Hermann Von Helmholtz dans l'année 1853. Il a remarqué que l'application d'une différence de potentiel sur des électrodes mises en contact avec un électrolyte provoque un regroupement d'ions de cet électrolyte à la surface de cette interface [2]. Supercondensateurs, ou bien "condensateurs électriques à double couche" (en anglais electric double layer capacitors EDLC) sont des condensateurs à valeurs de capacité supérieures à tous autres types de condensateur disponibles aujourd'hui. Ces valeurs de capacité atteignent jusqu'à 4000 Farads.

Le principe général de fonctionnement des supercondensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte[39].

Un supercondensateur se présente sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide [2, 40]:

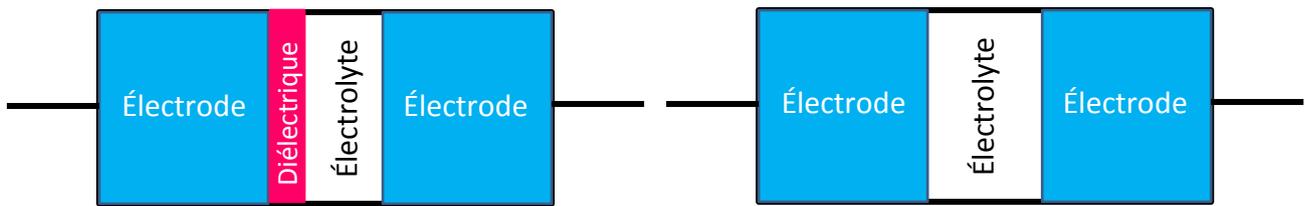


Figure 1-26 Différence entre un condensateur classique (à gauche) et un supercondensateur (à droite)

L'avantage le plus significatif du supercondensateur par rapport aux batteries, est sa capacité d'être rapidement chargé et déchargé de façon continue et répétée sans dégradation du niveau de sa tension, c'est pour cette raison que lors de leurs utilisations, les supercondensateurs complètent les batteries. Autrement dit, le supercondensateur alimente le système quand il y a appels de courant ou de puissance, tandis que les batteries fournissent l'énergie en vrac, sachant qu'elles peuvent stocker et livrer une grande quantité d'énergie sur une plus longue période de temps.

### 1.6.1 La construction des supercondensateurs

La constitution du supercondensateur est semblable à celle d'un accumulateur électrochimique, il est constitué de deux électrodes et d'un électrolyte. Il existe trois principaux types de supercondensateurs, qui diffèrent par la nature des électrodes (Charbon actif, les fibres de tissu activé) et par leur fonctionnement, les plus répandus sont ceux à charbon actif, en raison de leur faible coût et de leur longue durée de vie due à leur fonctionnement purement électrostatique.

#### 1.6.1.1 Electrode en charbon actif

Le charbon actif est un composé carboné. Les procédés de fabrication des carbones activés sont de deux types : l'activation dite « physique » et l'activation « chimique ». Il existe divers types de charbon actif ayant des surfaces spécifiques comprises entre  $100\text{m}^2/\text{g}$  et  $2500\text{m}^2/\text{g}$ . La tendance actuelle est d'utiliser des charbons de surfaces comprises entre  $700$  et  $1800\text{m}^2/\text{g}$ . [41].

### 1.6.1.2 Electrode en fibres de tissu activé

Ce sont des produits basés sur l'utilisation de fibres polymères ayant subi une calcination et une activation. Les surfaces spécifiques actives atteignent là encore  $2000 \text{ m}^2/\text{g}$ . Par rapport aux charbons actifs, ces produits présentent des porosités bien supérieures, une meilleure conductivité électronique avec moins d'impuretés [42]. Le seul désavantage de ce type d'électrode est le coût très supérieur par rapport à la technologie basée sur les charbons actifs[41].

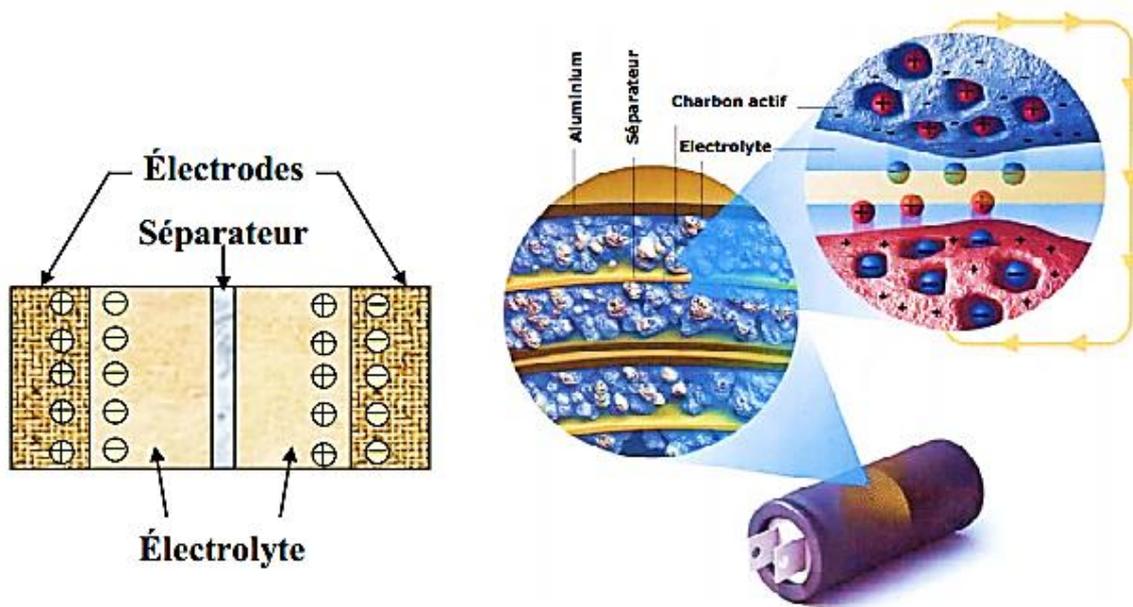


Figure 1-27 Structure d'un supercondensateur (à double couche électrique)[41]

### 1.6.1.3 L'électrolyte

Le choix de l'électrolyte se base sur deux critères : la conductivité et le potentiel maximal supporté par l'électrolyte. Il existe deux types d'électrolyte : aqueux comme  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ou  $\text{KOH}$  qui possèdent un domaine de potentiel limité, mais une conductivité élevée. L'autre solution est l'utilisation d'un électrolyte organique (tel que le Carbonate de Propylène) avec un domaine de potentiel plus élevé mais une conductivité plus faible. L'électrolyte peut être liquide ou polymère (plastique ou gel). Afin d'obtenir des densités de puissances importantes, la technologie "film mince-électrolyte liquide" semble la mieux adaptée[41].

### 1.6.1.4 Le séparateur

Il existe peu de solutions pour le séparateur : le séparateur le plus utilisé est sans doute le Celgard, mais il existe aussi des séparateurs celluloses[43, 44].

### 1.6.2 L'énergie emmagasinée dans un supercondensateur

Dans un condensateur, l'énergie emmagasinée  $E_{sc}$  est liée à la capacité du supercondensateur  $C_{sc}$  et à la tension de service (équation 1.18).

$$E_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} V^2 \quad (1.17)$$

$C_{sc}$  est directement proportionnelle à la surface "A" de chaque électrode et inversement proportionnelle à la distance "D" entre les électrodes. Ceci est décrit dans l'équation ci-dessous:

$$C_{sc} = Z_0 Z_r \frac{A}{D} \quad (1.18)$$

$Z_0$  est le constant diélectrique de l'espace libre et  $Z_r$  est le constant diélectrique du matériau isolant entre les électrodes et le séparateur non perméable.

Le plus grand facteur dans la détermination de la performance du supercondensateur est l'énergie perdue par la résistance interne, la diminution de sa valeur augmente la densité de puissance [45].

### 1.6.3 Circuit équivalent d'un supercondensateur

Le condensateur à double couche électrique stocke les charges d'une manière différente par rapport à la conventionnel condensateur électrolytique [46]. Les modèles traditionnels sont insuffisants pour décrire l'EDLC, bien que les équations de base pour condensateurs soient encore valables. Les surfaces des couches doubles formé par le charbon actif d'un supercondensateur peut être modélisée en tant que "une série d'un circuit RC parallèles" comme le montre la figure ci-dessous[47]:

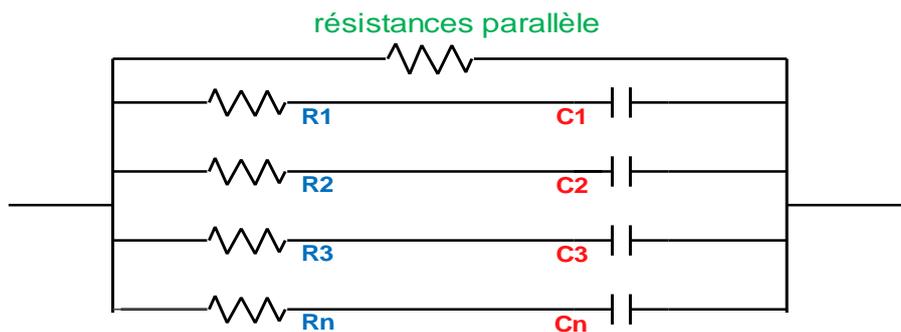


Figure 1-28 Circuit équivalent d'un EDLC

$R_1, R_2, R_3 \dots R_n$  représentent la résistance série et  $C_1, C_2 \dots, C_n$  sont les capacités électrostatique des charbons actifs. Lorsqu'une tension est appliquée, le courant circule à travers chacun des circuits RC.

Un modèle de premier ordre du supercondensateur est présenté dans la figure 1-28, est un circuit idéal qui se compose de quatre éléments: une capacité  $C$ , une résistance série  $R_s$ , une résistance parallèle  $R_p$ , et une inductance série  $L$ .  $R_s$  est appelée la résistance série équivalente (RSA), elle provoque les pertes d'énergie lors de chargement et déchargement du supercondensateur.  $R_p$  stimule les pertes d'énergie due à autodécharge de supercondensateur, et souvent désigné comme la résistance du courant de fuite. L'inductance  $L$  résulte principalement de la construction physique du condensateur et généralement elle est de petite taille[41, 47].

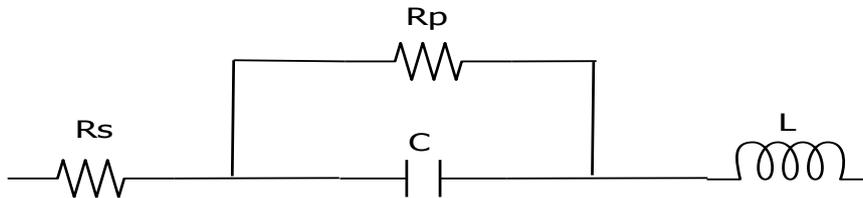


Figure 1-29 Modèle de premier ordre d'un supercondensateur

L'autre modèle qui peut représenter un supercondensateur c'est le modèle de la ligne de transmission. Les supercondensateurs généralement présentent un comportement non idéal en raison de poreux matériau utilisé pour former les électrodes, qui provoquent la résistance et la capacité, de telle sorte que le comportement imite la réponse d'une ligne de transmission électrique[48].

Ce circuit est illustré dans la figure suivante:

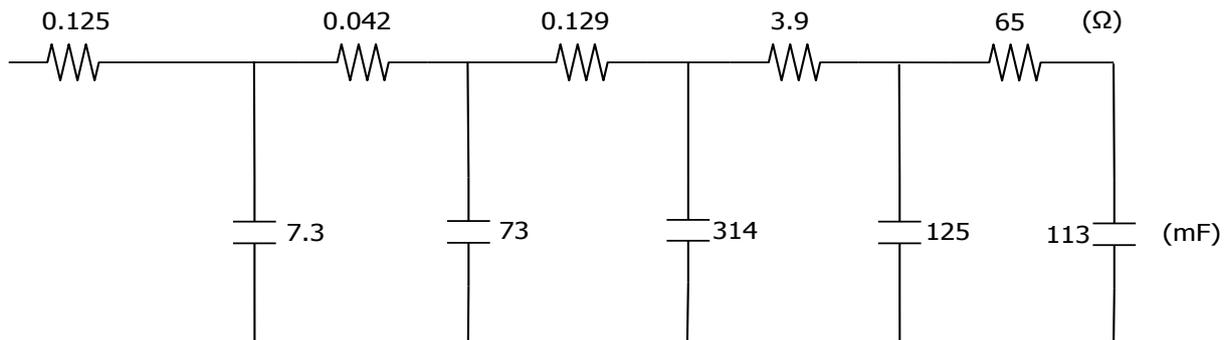


Figure 1-30 Modèle de J.R. Miller d'un supercondensateur 0,64 F[48]

Un autre modèle a été proposé dans [40]:

Il vise à remédier aux limites du modèle à deux branches, par une fidélité accrue aux principes de stockage d'énergie dans les supercondensateurs. Il se compose:

- d'une ligne de transmission non-linéaire de résistance totale  $R$  et de capacité totale  $C$ , pour une description fine du comportement électrique et énergétique des supercondensateurs dans les temps courts,

- de quelques cellules "RC" pour appréhender les temps plus longs.

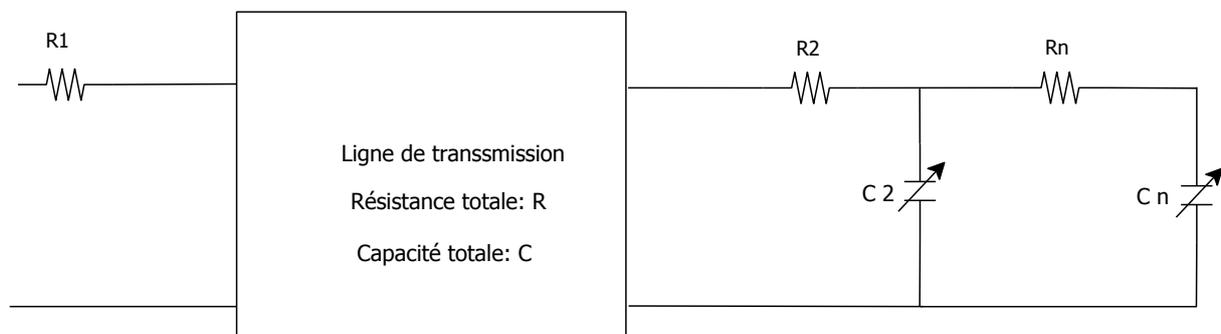


Figure 1-31 Modèle énergétique de supercondensateurs à couche double électrique

## 1.6.4 Avantages et inconvénient des supercondensateurs

### 1.6.4.1 Les avantages

- Très haute tensions cellulaire est possible.
- Haute densité de puissance.
- Peut résister des températures extrêmes.
- Charge et décharge très rapide (un dynamique rapide).
- Longue durée de vie.

### 1.6.4.2 Les inconvénients

- Faible densité d'énergie.
- Des mises en série sont nécessaires pour obtenir des tensions plus élevées que les quelques volts d'une cellule élémentaires.
- Le prix des supercondensateurs est plus élevé que celui des batteries.

## **1.7 Conclusion**

Dans le premier chapitre, on a discuté les différentes sources électriques d'un système hybride afin de pouvoir évaluer son performance et son comportement en intégrant toutes ces sources, à savoir le générateur photovoltaïque, l'éolienne, la pile à combustible, les batteries et les supercondensateurs. L'exploitation d'une source hybride nécessite la bonne maîtrise de ses sources, c'est pour cela, ce premier chapitre a été consacré à une étude théorique et une analyses de leurs caractéristique, ces différents modèles, différents types, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Par conséquent, nous avons conclu qu'on peut utiliser comme sources principales les générateurs photovoltaïques et les éoliennes grâce à leurs énergies spécifiques élevées. Par ailleurs, l'intermittence et la dépendance de ses sources aux conditions climatiques nous orientent vers une autre source qui peut être la pile à combustible comme un système de backup. Les batteries et les supercondensateurs peuvent être employés comme sources auxiliaires destinées au stockage de l'énergie afin d'amender le comportement de notre système hybride en régime permanent et transitoire dans son application, soit une intégration dans les réseaux électrique intelligents (à grand échelle), ou bien pour les réseaux intelligents isolé de petit taille (micro smart grid).

Le chapitre suivant est totalement consacré à la notion du smart grid, leur caractéristique, topologies et leur infrastructure. Nous allons aussi discuter les différentes méthodes d'optimisation de l'utilisation des sources renouvelables dans ces réseaux intelligents.

## Chapitre 2

# "Smart grid" ou le réseau intelligent et les méthodes d'optimisation

## 2.1 Introduction

Les tendances récentes, y compris l'augmentation des besoins en électricité et la progression dans les technologies de la gestion du réseau, sont les origines des idées pour renouveler les réglementations électriques et la façon dont le réseau est géré. Dans le monde entier, l'industrie commence à employer des micros réseaux «intelligents» qui utilisent les technologies de l'information et de la communication pour construire des systèmes d'alimentation électrique plus fiable et efficace. Ces technologies peuvent également aider à permettre des niveaux plus élevés des énergies renouvelables. Dans ce contexte et dans ce chapitre nous allons présenter une vue générale sur le smart grid (le réseau intelligent), en donnant sa définition, son architecture, sa conception, une analyse de ses caractéristiques et enfin une justification de l'utilisation de ce nouveau terme.

Dans une deuxième partie, nous allons présenter une étude sur les différentes méthodes employées pour la conception optimale des sources renouvelables constituant un système de production hybride qui peut être intégré dans un micro smart grid.

## 2.2 Smart grid (SG)

Avec la croissance de plus en plus d'énergie électrique, la qualité de service et la continuité de l'approvisionnement ont été la plus grande primauté pour tous les principaux secteurs de services publics d'électricité à travers le monde. Smart Grid est principalement proposé comme la solution convenable dans l'exploitation et la communication technologique pour améliorer la fiabilité du réseau, et de permettre l'intégration de divers ressources telles que les énergies renouvelables, ainsi que la satisfaction de la demande énergétique, le stockage et le transport électrique. Il permet une concurrence entre les producteurs de l'énergie, une utilisation des ressources d'énergie intermittentes, établir l'automatisation d'une façon étendue, le suivi des différentes fonctionnalités, comme la transmission sur de grandes distances ainsi que la production d'électricité décentralisée.

Pour répondre aux demandes croissantes d'électricité, de nouvelles centrales électriques et des nœuds de distribution ont été utilisés pendant plusieurs années, toutefois, ces modifications sont chères, coûtant jusqu'à 2.000 \$ par kilowatt, la maison moyenne consomme environ 2 kilowatts d'électricité par heure, donc la construction d'installations électriques pour servir 1000 maisons pourraient coûter 4 millions \$[49].

En outre, la construction de nouvelles centrales électriques ne peut être atteinte facilement en raison de préoccupations réglementaires et environnementales et ne semble pas être une approche acceptable pour la demande croissante d'électricité. Donc, la révision du réseau de distribution et d'alimentation en cours et les marchés de l'énergie que nous avons exploités nous orientent vers les ressources renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire qui pourrait être la meilleure solution au lieu de construire plus de centrales classiques. Cette approche est adoptée par ceux qui sont au travail à la mise en œuvre de technologies des Smart Grid dans le monde.

### **2.2.1 Concept d'un Smart grid**

Le terme Smart Grid a été inventé par Andres E. Carvallo en 24 Avril 2007 à une Conférence de l'énergie à Chicago, où il a présenté le SG comme une combinaison de l'énergie, les communications, les logiciels et les matériels de protection automatisés. La définition d'un SG est l'intégration d'un réseau électrique, un réseau de communication, des logiciels et du matériel afin de surveiller, contrôler et gérer la production, la distribution, le stockage et la consommation d'énergie [49].

Les SG sont la base pour le développement de la transmission des informations électriques, des réseaux de distribution fortement flexibles, des réseaux fiables et des systèmes durables. Les structures optimales d'un SG doivent être développées pour des principaux concepts en tenant compte de:

- Intégration des sources d'énergie renouvelables,
- Application des technologies novatrices, par exemple dispositifs de stockage d'énergie, électronique de puissance, les véhicules électriques (VE)...etc,
- Utilisation des technologies de la communication pour améliorer l'observabilité et la contrôlabilité des réseaux,
- Développement de l'application intelligente pour les systèmes de protection avec des concepts d'automatisation,
- Haute sécurité de production d'énergie et des différentes informations liées au SG,
- Conception de nouvelles structures du réseau, par exemple "micro smart grid", réseaux DC, les réseaux de transmission avec stockage.

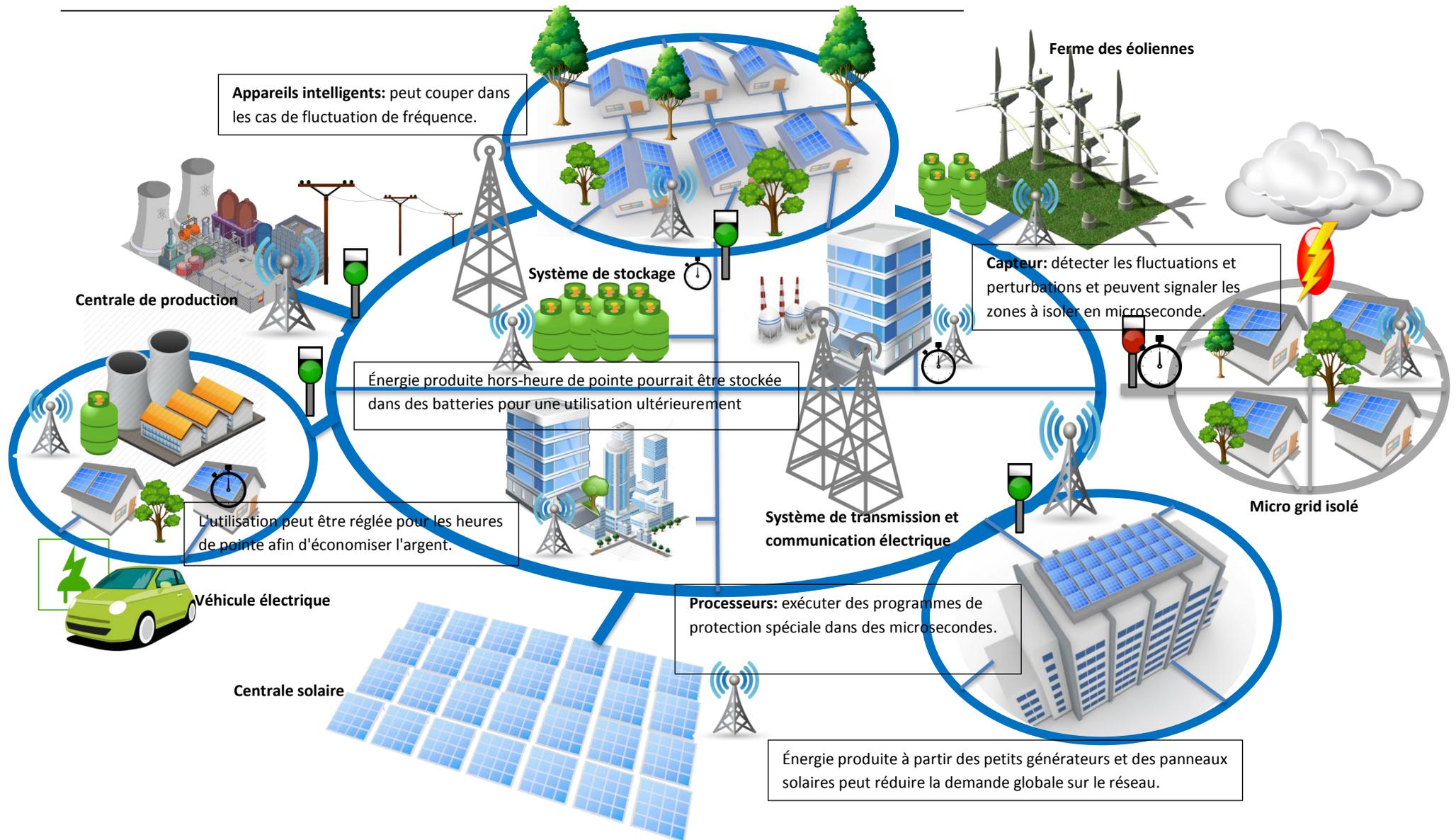


Figure 2-1 Architecture d'un smart grid.

Selon le ministère de l'environnement des Etats-Unis, un smart grid est un réseau électrique où tous les participants dans le système de réseau (à partir de générateurs d'électricité, de transmission, transport d'énergie et les opérateurs de distribution, jusqu'aux consommateurs d'électricité) communiquent et travaillent les uns avec les autres pour accroître l'efficacité et la fiabilité du réseau.

L'élément clé d'un réseau intelligent est l'utilisation des technologies avancées (comme les compteurs intelligents) qui offrent aux participants, des informations pertinentes en temps réel. Ces technologies permettent aux générateurs, les gestionnaires du système et aux clients de recevoir des informations instantanées sur ces besoins d'électricité, les prix, et de travailler ensemble pour répondre aux besoins énergétique avec la façon la plus efficace possible.

Des politiques complémentaires, qui doivent souvent être établies par les organismes de réglementation des services publics dans le monde entier, sont tenus de veiller à ce que ces technologies sont vraiment efficaces. Ces politiques peuvent inclure les taux de conceptions et des normes d'interconnexion afin d'arriver à des productions décentralisées propres, à un financement de ces programmes d'études d'efficacité énergétique et enfin des modèles réels qui encouragent les clients à économiser de l'énergie.

Ces réseaux intelligents sont considérés dans plusieurs pays du monde (comme la Chine, la Finlande, les Etats-Unis...etc.) comme une étape qui peut faire partie d'une stratégie très large pour répondre aux besoins écologique-environnementale, besoins énergétique et aussi pour des objectifs politiques.

### **2.2.2 La notion de l'intelligence dans un réseau électrique**

La demande d'énergie, continu d'accélérer en raison de la croissance de la population et le développement des technologies électriques. En revanche, l'infrastructure des réseaux électriques est considérablement vieille. Par conséquent, l'amélioration de ces infrastructures devient nécessaire[50].

La figure 2-2 illustre le flux d'électricité à partir de la centrale de production jusqu'à l'utilisateur final dans le réseau classique. Le bon fonctionnement du réseau électrique dans son ensemble dépend des performances fiables de chacun de ces composants. Comme la demande augmente, chaque composant doit être capable de gérer ses nouvelles exigences où l'ensemble du système devient non fiable.

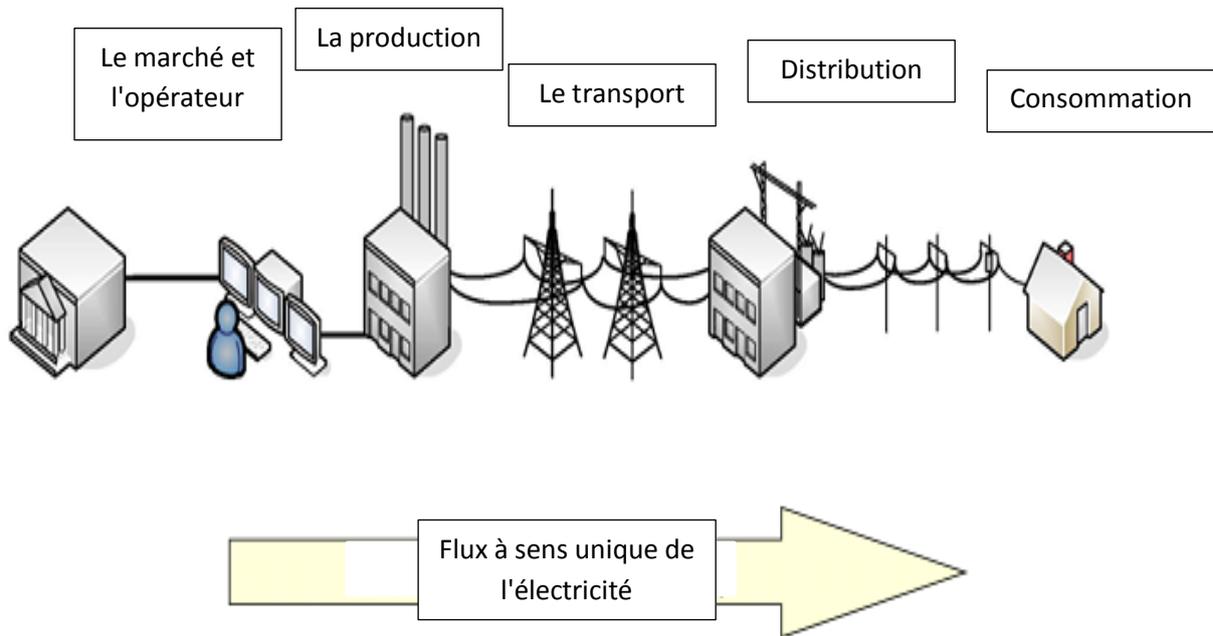


Figure 2-2 Infrastructure d'un réseau électrique classique[51]

Ces réseaux classiques sont généralement centralisés, la production de l'énergie est fortement dépendante du charbon et du pétrole, l'automatisation est limitée dans les différents étages (production, transport, distribution et la protection) et la conscience de la situation est très limitée par les consommateurs, vu le manque de données pour gérer leur consommation d'énergie.

D'autre part, le SG implique l'utilisation des capteurs, des communications et de contrôle, la capacité de calcul de telle sorte que la fonctionnalité globale du système par ces différents étages est améliorée. Ceci permet plusieurs fonctions telles que l'optimisation de la production électrique, les systèmes de stockage, participation de consommateur dans le système afin d'assurer plus de fiabilité, un système de communication entre les différents composants, intégration des énergies renouvelables.

Par conséquent, une intégration d'ingénierie intelligente des systèmes d'alimentation et de technologies de l'information et de la communication est nécessaire pour permettre à un réseau d'être plus "smart" et, à son tour, cette intégration peut permettre une amélioration dans la fiabilité, l'efficacité et la capacité opérationnelle[52].

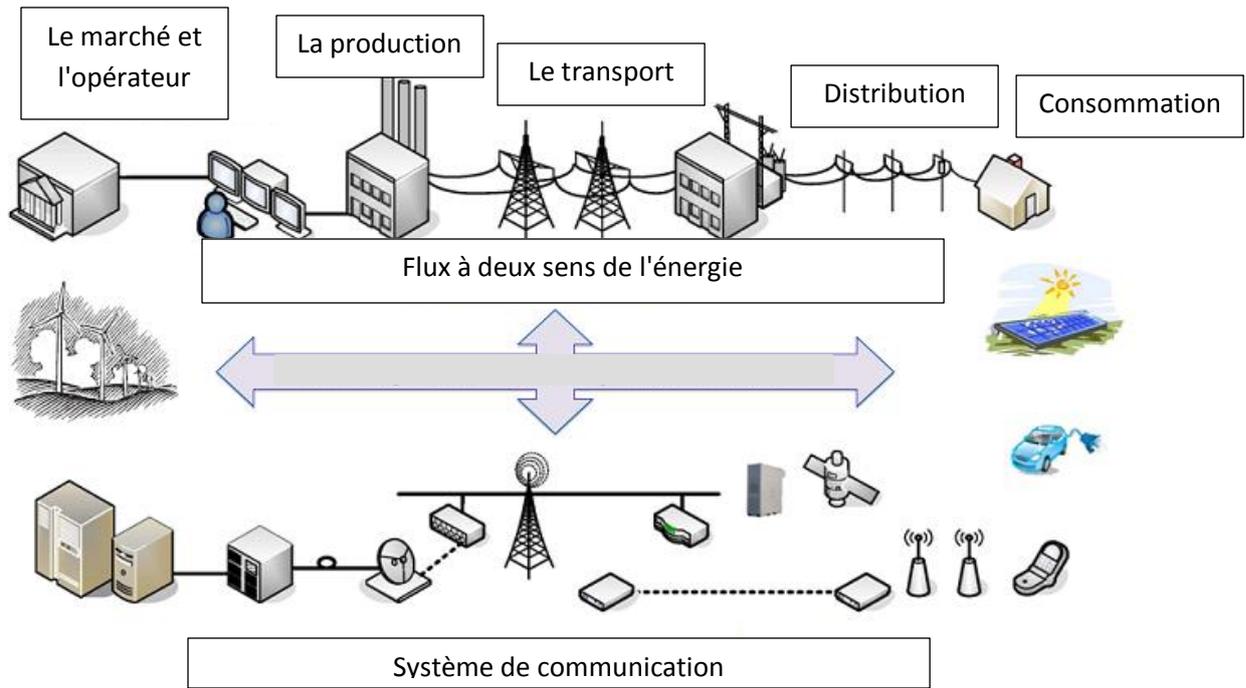


Figure 2-3 Infrastructure d'un réseau électrique intelligent.

La transition vers un smart grid nécessite l'ajout de nouvelles fonctionnalités et capacités pour le réseau électrique existant. La production décentralisée est une caractéristique commune dans les SG. En outre, la nature de ces générateurs de productions est variée, car ils peuvent être renouvelable, tel que les éoliennes, les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible destiné à la cogénération, les micros turbines ou les génératrices de diesel [53, 54].

Les dispositifs qui sont capables de stocker l'énergie, telles que les batteries électriques peuvent aider le système de couvrir la nature intermittente causée par le comportement des sources renouvelables, par suite, la facilité de l'intégration de ces ressources. La prochaine génération du réseau électrique facilitera également l'électrification des systèmes de transport [55].

Le SG se compose de différentes entités pouvant interagir l'une avec l'autre de manière bidirectionnelle, permettant à l'opérateur et les responsables commerciales de servir, de demander de l'énergie électrique ou de résoudre les problèmes techniques qui pourraient survenir, donnant ainsi les moyens au consommateur pour participer au réseau. Ces propriétés intelligentes de SG peuvent répondre aux changements dans les prix de l'énergie, en permettant aux opérateurs du réseau de minimiser le coût de l'énergie dont ils ont besoin pour acheter ou de maximiser les profits de l'énergie qu'ils peuvent vendre[53].

Le tableau suivant présente les grandes nations initiatives dans le SG, le tableau dévoile les améliorations, les caractéristiques implémentées et les bénéfices obtenus [56].

Tableau 2.1 les grandes nations initiatives dans le Smart Grid

Pays	Les améliorations	Implémentations	Bénéfices
L'ETATS-UNIS	Des compteurs intelligents, AMI, VPP, WAMS etc.	*différents projets liés au smart grid : 13 milliards \$ par année, estimés 20 milliards \$ par année pour être consacré à la T&D , des études sur WAMS etc.	*Réduction annuelle de la facture d'électricité par 10%, jusqu'à 200 milliards \$. * investissements en Smart grid par 30 milliards \$.
EUROPE	Les énergies renouvelables, Des compteurs intelligents, véhicules électriques, Stockage de l'énergie, etc.	Développement des énergies renouvelables, les compteurs intelligents avec la tarification horaire, appareils intelligents etc.	Gestion de la demande, amélioration de la qualité d'énergie, la stabilité de réseau, l'efficacité énergétique.
INDE	Réduction des pertes de T&D, WAMS, SGMM, QoS, etc.	Utilisation de DSM pour limiter de manière sélective la consommation d'électricité, amélioration de la qualité de l'énergie, accroître l'utilisation des énergies renouvelables, efficacité intelligente dans la forme DG, etc.	Électrification rurale, surveillance en ligne de l'état de système, stratégie de marché improvisé par la technique de fixation des prix en temps réel.
LA CHINE	Développer de T&D capacité, réduire les pertes en ligne, tension de transmission édifiante , l'installation des transformateur en haute efficacité, etc.	Développement d'EHVAC et HVDC, utiliser des transformateurs de distribution efficace, transport de l'électricité en HT	réseau d'alimentation des zones larges, efficacité de la transmission et distribution.
FINLAND	AMI, IHDs, ICTs, Des compteurs intelligents etc	Installation de l'AMI et des compteurs intelligents équipé en technologies avancées	Le diagnostic de pannes, la localisation de défauts, rétablissement du service, le contrôle de la puissance réactive.

Sens de quelques terminologies utilisées dans le domaine du SG:

- AMI: advanced metering infrastructure.
- VPP: Virtual Power Plants.
- WAMS: Wide Area Measurement System.
- T&D: transmission and distribution.
- SGMD: Smart Grid Maturity Model.
- QoS: Quality of service.
- IHD: in-home dispays.
- ICT: information and communication technology.
- RES: renewable energy system.
- DSM: demand system management.

### **2.2.3 La technologie d'un SG**

Le SG a été déployé à travers des divers pays à base de technologies avancées, donc il ya quelques éléments essentiels qu'il faut mentionner pour exploiter le sens d'un réseau électrique intelligent. Nous allons présenter dans cette section les points forts en bref des trois technologies primitives et cruciales dans les SG.

#### ***2.2.3.1 La fonction de distribution d'énergie dans un SG***

les fonctions intelligentes du réseau de transport sont envisagées, résumées et discutés dans [57] par les points suivants: la digitalisation, la flexibilité, l'intelligence, la résilience, la durabilité et la personnalisation.

Le réseau de transport intelligent vise à promouvoir l'innovation de la technologie pour atteindre une prestation peu coûteuse, fiable, flexible et durable. Il permet également une partie des fonctionnalités clés telles que:

- Une flexibilité accrue dans le contrôle, l'exploitation et l'expansion.
- Développement de l'intelligence embarquée.
- Durabilité des réseaux.
- Améliorer les prestations de la clientèle et la qualité du service.

### **2.2.3.2 La technologie d'information et de communication dans un SG**

Dans le SG, les informations cohérentes sont le facteur clé pour la livraison fiable de l'énergie électrique à partir de l'unité de génération jusqu'aux utilisateurs finaux. L'absence d'analyses automatisées, mauvaise visibilité, réponse lente des interrupteurs mécaniques et le manque de connaissances de la situation, étaient les quelques inconvénients du réseau classique. Avec l'incorporation de technologies modernes, l'architecture du réseau intelligent augmente la stabilité et la flexibilité du réseau électrique en introduisant une détection et une commande rapide à travers les protocoles et les topologies de communication avancés.

Les modes filaires et sans fil sont employés pour la transmission et la communication des données et des informations entre les consommateurs intelligents et les secteurs de production d'énergie électrique. Chacun de ces modes de communication a ses propres avantages et inconvénients par rapport à l'autre, en fonction des divers facteurs tels que la situation géographique, le coût d'investissement, le système d'utilisation, etc...

### **2.2.3.3 Les compteurs intelligents (AMR)**

AMR (en anglais: Automatic Meter Reading) est un outil qui va bénéficier non seulement la partie de facturation des entreprises et abonnés, mais tous les autres consommateurs, ainsi que les petits producteurs qui composent notre SG. Donc les systèmes AMR permettront non seulement l'utilité d'obtenir le prix d'un kWh à tout moment, mais aussi il va permettre de lire la demande max avec horodatage, les niveaux de tension et le nombre des pannes sur chaque mis à jour. Cette technologie permet aux utilisateurs d'avoir beaucoup d'informations sur ses profils de consommation qui n'a jamais été disponible avant, tout ayant la possibilité d'avoir un accès rapide à l'information de chaque minute de la journée.

La communication bidirectionnelle des données permet une grande capacité de collecter les informations préméditées entre les différents points de consommation, les dispositifs de contrôle et les postes d'opérateurs dans un SG. Donc, l'AMR est utilisé pour surveiller le flux de l'énergie électrique dans les zones de distribution. Avant les technologies du réseau intelligent, la seule façon de savoir s'il y avait un vol de puissance active c'était d'aller soit au point de consommation pour enquêter ou via une déclaration d'un autre abonné, toutefois le système AMR offre une détection très rapide dans les cas de vol de puissance.

## 2.3 Les méthodes d'optimisation

L'optimisation sert à rechercher le meilleur parmi un grand nombre de solutions possibles. Le principal objectif d'optimisation dans la rentabilité des systèmes hybrides, y compris les sources de production et même ses composants associés, est de déterminer un ensemble des paramètres, la topologie et le nombre des unités utilisées pour satisfaire certaines spécifications et objectifs sous des contraintes de conception, tels que la puissance de sortie, l'efficacité, le volume et le coût.

Les ingénieurs ont eu recours à des méthodes d'optimisation pour optimiser la conception du dimensionnement des dispositifs des systèmes hybrides, leurs composants et même parfois leurs systèmes de contrôle pour des décennies. Cette partie vise à présenter les méthodes d'optimisation couramment utilisés dans le domaine de dimensionnement des systèmes hybrides ainsi que les différents opérations liées aux réseaux intelligents, ou nous présenterons les divers algorithmes déterministes et stochastiques d'optimisation.

### 2.3.1 Les méthodes déterministes

L'optimisation déterministe, ou l'optimisation par programmation mathématique, incarne les algorithmes qui dépendent fortement d'algèbre linéaire, car ils sont généralement basés sur le calcul du gradient. L'optimisation déterministe a des avantages et des inconvénients. L'avantage le plus remarquable c'est que la convergence vers une solution est beaucoup plus rapide par rapport à l'optimisation par algorithmes stochastiques[58].

Les algorithmes d'optimisation déterministes cherchent le point le plus proche qui satisfait les contraintes imposées aux variables, donc, la solution optimale trouvée pourrait être un optimum local et pas globale.

Il y a deux principaux aspects de l'optimisation déterministe, à savoir: l'optimisation sans contraintes et optimisation sous contraintes.

#### 2.3.1.1 Les Méthodes d'optimisation sans contraintes

Plusieurs méthodes mathématiques servent à optimiser des problèmes sans contraintes imposées aux fonctions objectifs, ou nous citons les approches suivantes:

- La méthode de Simplexe
- La méthode de Newton

- La méthode de Quasi-Newton
- Méthode du gradient conjugué
- Méthode de Levenberg–Marquardt

### 2.3.1.2 Les Méthodes d'optimisation avec contraintes

La structure d'un problème d'optimisation sous contrainte est la suivante:

Minimiser  $f(x)$ : fonction à optimiser.

Sous les contraintes :  $g(x) \leq 0$  : (m contraintes d'inégalité)

$h(x) = 0$  : (p contraintes d'égalité)

Avec  $x \in R^n$ ,  $g(x) \in R^m$ ,  $h(x) \in R^p$ , Tel que:  $x$  exprime le vecteur des variables de décision dans l'espace de recherche  $\Omega$ .

$f(x)$  est la fonction objectif,  $g(x)$  sont les contraintes d'inégalités,  $h(x)$  est l'ensemble des contraintes d'égalités. Un point qui satisfait toutes les contraintes est dit être un point réalisable, et l'ensemble des points réalisables est la région réalisable  $R$ . On suppose que  $g(x)$ ,  $h(x)$  et  $f(x)$  sont continués,  $R$  est fermé, et pas de contraintes de la forme  $g(x) > 0$ . Si la région réalisable est non vide et bornée, il existe une solution  $x^*$  pour le problème d'optimisation.

Nous citons quelques approches d'optimisation avec des contraintes comme suit:

- La méthode d'élimination de gauss
- La méthode de Lagrangien
- La méthode active Set
- Méthodes des pénalités et des barrières
- Méthode de programmation quadratique séquentielle

### 2.3.2 Les méthodes stochastiques

L'optimisation stochastique comprend les méthodes d'optimisations dans lequel le hasard (en anglais: randomness) est présent dans la procédure de la recherche. Ceci est une définition assez générale pour l'optimisation stochastique, dont le hasard peut être inclus dans de nombreuses manières[58].

Il existe plusieurs types d'algorithmes stochastiques d'optimisation, nous citons les familles suivantes:

### 2.3.2.1 Algorithme de colonies de fourmis (ACO)

La recherche de nourriture est la principale tâche des fourmis pour la survie. Les fourmis peuvent s'adapter aux changements dans l'environnement en optimisant le chemin entre le nid et la source de la nourriture. Cela est dû à la stigmergie entre eux, donnée par le dépôt continu de substance chimique, connue sous le nom de phéromone [59, 60].

Les fourmis convergent vers le chemin le plus court en sélectionnant le chemin qui a un dépôt plus élevé de phéromone (figure 2-4).

- La moitié des fourmis prennent une voie et l'autre moitié prennent un autre chemin pour accéder à la source de nourriture.
- Sur leur chemin, ils déposent la phéromone.
- Les premières fourmis qui atteignent la source de nourriture, ce sont elles qui vont revenir en premier pour donner l'information aux autres fourmis.
- Par conséquent, la quantité de dépôt de la substance chimique sur le trajet le plus court serait plus élevée.

Un exemple classique de la recherche de nourriture par le chemin le plus court peut être donné dans la figure 2-4.

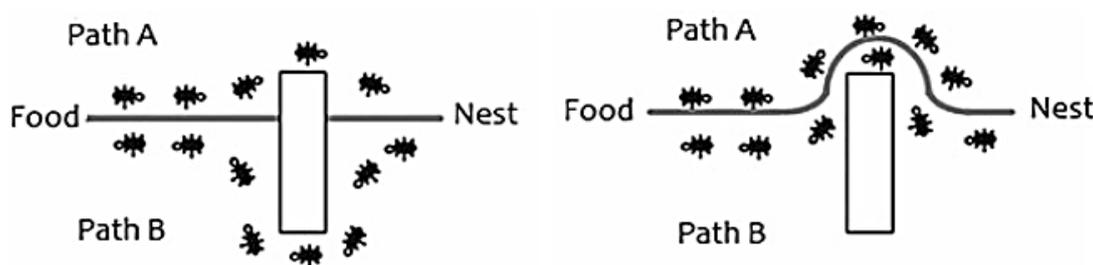


Figure 2-4 Les fourmis convergeant vers le chemin le plus court[61]

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{si une fourmi } k \text{ utilise les coordonnées } (i,j) \text{ dans sa tournée} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.1)$$

$\Delta\tau_{ij}^k$ : La phéromone déposée à partir du nœud  $i$  au nœud  $j$  et  $Q$  est une constante.

La quantité de dépôt de phéromone est inversement proportionnelle à la longueur du trajet[62]

Plus le chemin est long, plus la déposition de phéromone est petite, et plus le chemin est court, plus la déposition de phéromone est élevée[58, 62].

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (2.2)$$

### 2.3.2.2 Optimisation par essaim de particules (PSO)

Dans l'optimisation par essaim de particules le degré d'optimalité est mesuré par une fonction fitness. Le PSO est inspiré d'un comportement collectif et l'intelligence émergente qui existent dans les sociétés à population organisée comme les oiseaux [63, 64].

Lorsque les oiseaux affluent collectivement ensemble, ils présentent un beau modèle coordonné. Ils suivent un modèle comportemental dans lequel chaque agent suit trois règles [60]

- Séparation: chaque agent essaye de s'éloigner de son voisin si tous deux sont trop proches par rapport à la séparation entre les agents voisins.
- Alignement: ils s'alignent soit en ligne droite ou dans une formation parallèle.
- Cohésion: chaque agent tente de se positionner au milieu entre ses voisins.

Par transformation des données précédentes d'un essaim de particule à un algorithme, on estime qu'au début, chaque particule est positionnée (aléatoirement ou non) dans l'espace de recherche du problème.

Dans chaque itération les particules réagissent en fonction de trois paramètres [65]:

- Sa vitesse actuelle.
- Sa meilleure solution  $L_i$ .
- La meilleure solution obtenue dans son voisinage  $L_g$ .

$$v(k+1) = \omega v(k) + c_1(L_i + x(k)) + c_2(L_g + x(k)) \quad (2.3)$$

$$x(k+1) = x(k) + v(k+1) \quad (2.4)$$

Où  $v(k)$  garde le suivi de la direction de vol des particules et empêche les particules de changer la direction d'une façon brusque.  $c_1(L_i + x(k))$  mesure la performance des particules

dans son point actuel par rapport aux performances, dans un point passé et  $c_2 (L_g + x(k))$  mesure la performance des agents par rapport à ses voisins.

### 2.3.2.3 Optimisation par colonie d'abeilles (BCO)

Pour la sélection de son fourrage, la colonie d'abeilles a trois composants principaux [60]:

La source de nourriture : La valeur de la source de nourriture dépend de plusieurs facteurs tels que la distance au nid, la richesse ou de la concentration de l'énergie dans la source, et la facilité d'extraction.

Les butineuses de fourrage: elles sont associées à une source d'alimentation particulière.

Les chômeuses : elles sont en deux types, les scouts et les spectateurs.

Les scouts sont celles qui cherchent une autre source alimentaire dans l'environnement, tandis que les spectateurs attendent dans le nid et établissent une source de nourriture à travers l'information partagée par les butineuses de fourrage. Dans une zone de danse, les spectateurs communiquent avec les butineuses de fourrage à l'aide d'une danse particulière appelée la danse frétilante.

L'emplacement de la source de nourriture représente la solution possible du problème, et la quantité du nectar de cette source correspond à une valeur objective dite fitness.

Les butineuses sont concédés aux différentes sources de nourriture de façon à maximiser l'apport total de nectar. La colonie doit optimiser l'efficacité globale de la collecte.

Les étapes principales de l'algorithme d'abeilles virtuelle pour l'optimisation des fonctions sont [66] :

- Création d'une population d'abeilles virtuelles, chacune a un vecteur de solution avec plusieurs paramètres à optimiser.
- Codage des fonctions d'optimisation et la conversion en nourriture virtuelle.
- Définition d'un critère pour transmettre la direction et la distance aux autres abeilles avec une manière similaire à l'aptitude physique des abeilles (la danse frétilante).
- Mettre à jour une population d'individus dans de nouvelles positions pour la recherche de la nourriture virtuelle, faisant la danse virtuelle pour définir la distance et la direction.

- Décodage des résultats pour l'obtention de la solution du problème.

De plus, un nouveau type pour l'optimisation stochastique a été développé en 2002 par le chercheur KM. Passino [67] nommé "Optimisation de butinage bactérienne"(en Anglais: Bacterial Foraging Optimization).

#### 2.3.2.4 Optimisation par algorithme génétique (GAO)

Algorithme génétique (GA) est une technique d'optimisation basé sur le principe de la sélection naturelle pour la reproduction et pour de diverses autres opérations telles que le croisement et la mutation.

Les algorithmes génétiques ont pour objectif de définir une solution approximative a un problème d'optimisation en un temps raisonnable, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte pour le résoudre ou que la durée de la phase de calcul est trop longue à l'échelle de la vie humaine.

Les AG explorent un grand nombre de possibilités pour des solutions optimisées, comme illustré sur la figure 2-5. Il fonctionne sur le principe de la sélection du meilleur et jeter le reste. Cette sélection combine une stratégie de survie des plus forts avec un échange d'information aléatoire mais structuré.

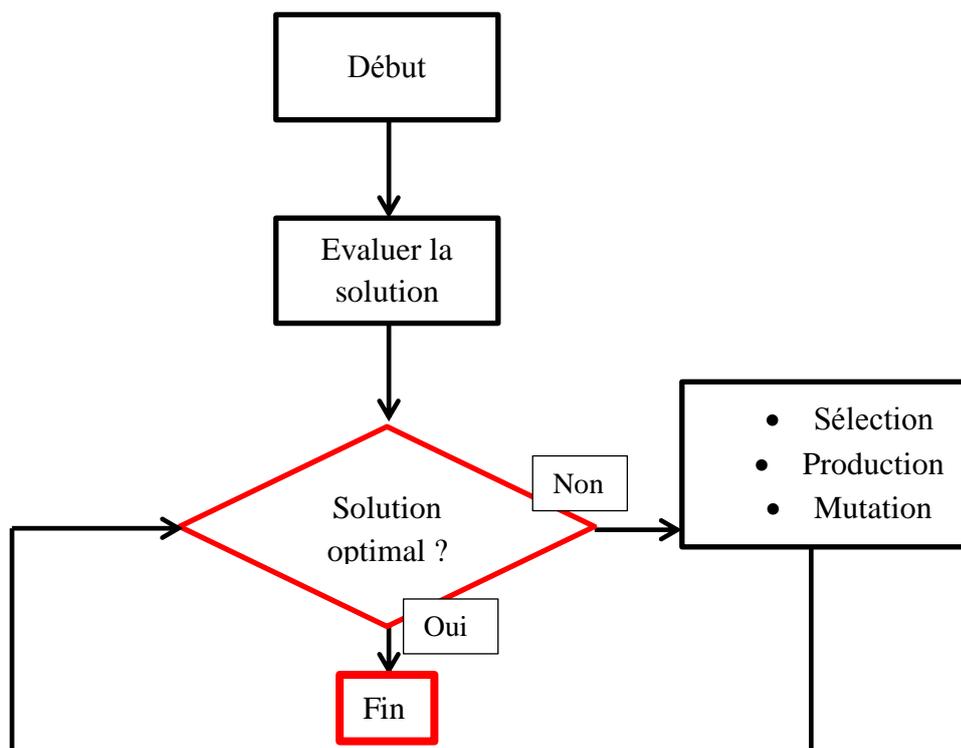


Figure 2-5 Processus de trouver une solution optimal par AG

Afin d'optimiser un problème ayant une solution inconnue, un ensemble de solutions éventuels est généré hasardeusement. On nomme cette composition "la population". Les variables dans un AG sont alors employées dans des suites de gènes qui seront combinées avec d'autres gènes pour former des chromosomes, puis des individus. Chaque solution est représenté par un individu ; cet individu est évalué puis classifié selon sa ressemblance avec la meilleure solution au problème.

Comme dans les systèmes biologiques, les meilleurs individus de la population sont ceux qui ont une meilleure chance de se reproduire et de donner une partie de leurs gènes à la prochaine génération.

Une nouvelle population (génération) sera créée en arrangeant les gènes des parents. Certains individus de la nouvelle génération possèdent les meilleures caractéristiques de leurs deux parents, donc ils seront meilleurs et présenteront une meilleure solution au problème.

La nouvelle génération est alors soumise à la même condition de sélection. Cette évolution est répétée plusieurs fois, jusqu'à ce que tous les individus possèdent le même héritage génétique. Les membres de cette dernière génération, qui sont habituellement très différents de leurs ancêtres, possèdent de l'information génétique qui correspond à la meilleure solution au problème[68].

Un algorithme génétique cherche à trouver les points optimaux d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer de cinq éléments [69]:

- Le principe de codage de l'élément de population: il se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques.
- Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures.
- Une fonction à optimiser qui retourne une valeur de  $R^+$  nommée "fitness" ou fonction « objectif ».
- Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état (croisement et mutation).

- Des paramètres de dimensionnement: taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

La forme la plus simple de l'algorithme génétique implique trois types d'opérateurs: sélection, croisement, et la mutation pour la production de nouvelle ère.

### ***Opérateur de Croisement***

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Généralement, les croisements sont distingués avec deux parents et génèrent deux enfants. Le croisement est effectué en choisissant au hasard un lieu d'échanger les séquences entre deux chromosomes pour créer deux progénitures. L'opérateur de croisement imite grossièrement la recombinaison biologique entre deux mono-chromosomiques. Il existe plusieurs types de croisement tels que: un point, deux points, uniforme, arithmétique.

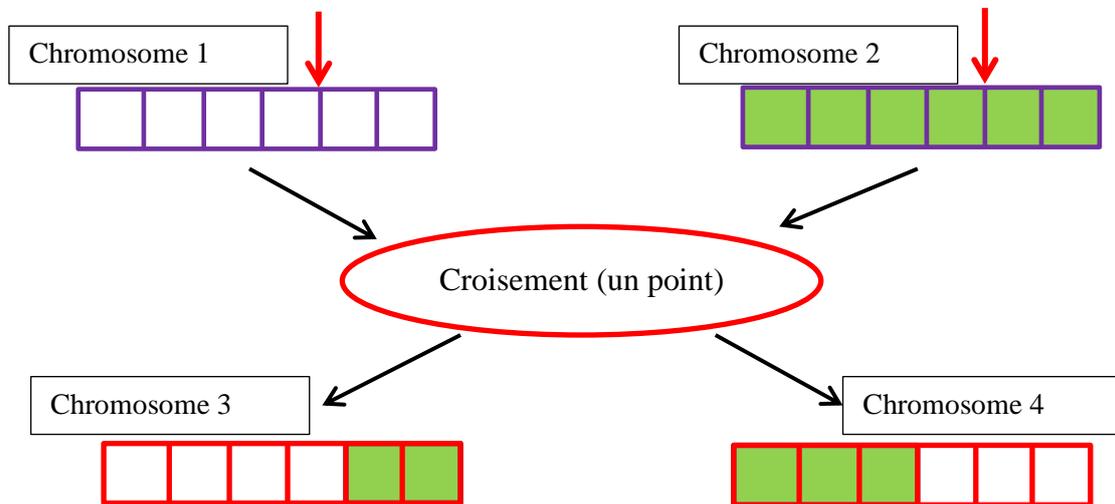


Figure 2-6 Opération de croisement dans un seul point

### ***Opérateur de mutation***

Avant de passer à l'explication de l'opérateur de mutation, il faut noter que le codage d'un algorithme génétique est représenté comme une séquence de bits. Les séquences sont amputées l'une après l'autre pour former les chromosomes et les gènes, donc un chromosome est représenté par un ensemble de bits.

Généralement l'opération de mutation est un changement d'un seul bit de 0 à 1 ou de 1 à 0. Lorsqu'un bit subit une mutation, cela apporte aux algorithmes génétiques la propriété

d'ergodique de parcours d'espace. Cette propriété indique que l'algorithme génétique peut atteindre tous les points de l'espace de recherche.

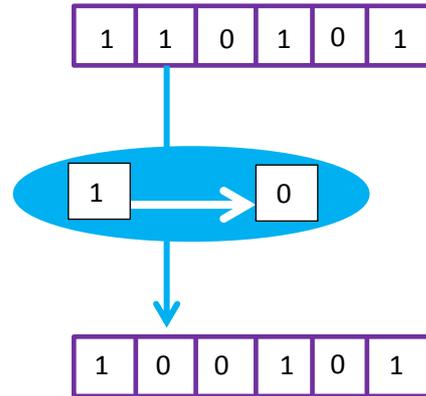


Figure 2-7 Opération de mutation d'un AG

### ***Opérateur de sélection***

Contrairement aux autres techniques d'optimisation, les algorithmes génétiques ne nécessitent pas d'hypothèse particulière sur la régularité de la fonction « objectif ». L'algorithme génétique n'utilise notamment pas ses dérivées successives, ce qui rend très vaste son domaine d'application. La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. [69]. On trouve dans la littérature un nombre important de principes de sélection, on cite les méthodes suivantes:

- Sélection par roulette (Wheel).
- Sélection par rang.
- Sélection steady-state.
- Sélection par tournoi.
- Elitisme.

## **2.4 Conclusion**

Dans ce deuxième chapitre, la notion des réseaux «intelligents» a été représentée. Le concept et l'infrastructure d'un SG a été étudiée. De plus, les différentes technologies qui peuvent constituer un smart grid ont été citées et discutées dans la première partie de ce chapitre.

Dans une deuxième partie, on a présenté une étude des différentes méthodes d'optimisation qui peuvent être employées pour la conception du dimensionnement optimale des sources renouvelables constituant un système hybride, afin de l'intégrer dans un réseau intelligent. Ces méthodes sont divisées en deux principales familles, à savoir les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques. La description de chaque méthode a été représentée en révélant la méthodologie de fonctionnement de ces algorithmes.

Le chapitre suivant sera consacré à la conception du dimensionnement optimal en utilisant l'une des méthodes stochastiques étudiées précédemment (les algorithmes génétiques) afin de démontrer la rentabilité des systèmes hybrides renouvelables.

## Chapitre 3

# Conception du dimensionnement optimal d'un système hybride

### 3.1 Introduction

Aujourd'hui, le système photovoltaïque (PV), les éoliennes (WT) et les piles à combustible (FC) sont les ressources alternatives et énergiques les plus importantes, et jusqu'à présent, plusieurs travaux de recherche et plusieurs méthodologies ont été développés concernant l'optimisation du coût d'investissement des sources renouvelables séparément et dans des systèmes hybrides (PV-WT-FC), pour des diverses applications, soit "autonome" soit "connecté au réseau".

Dans ce chapitre, nous allons présenter une nouvelle méthodologie pour la conception du dimensionnement optimal des systèmes hybride autonomes PV-WT-FC, avec des batteries et des supercondensateurs, pour l'alimentation d'un micro smart grid. Le but de la méthodologie proposée est qu'avec un coût total d'investissement minimisé, sous des contraintes représentées par les besoins d'énergie de la charge, qui doivent être complètement couvertes, de trouver le nombre optimal des unités assurant une bonne performance et un meilleur fonctionnement pendant une durée de vie de 20 ans, de notre système hybride.

L'objectif de ce chapitre est de prouver la rentabilité des systèmes autonomes hybrides destinés au micro smart grid; ces systèmes autonomes doivent contenir, les sources: photovoltaïque, éolienne, piles à combustible, batteries et supercondensateurs.

La méthodologie d'optimisation en utilisant les algorithmes génétiques, ainsi que la formulation du problème seront détaillés. Enfin, une configuration optimale obtenue avec une durée de vie de 20 ans sera discutée. Les paramètres optimisés seront également donnés.

### 3.2 Les systèmes hybride Photovoltaïque + Eolienne

Les systèmes photovoltaïques (PV) et les générateurs éoliens (WT) sont des sources d'énergie largement utilisés dans le but de fournir de l'électricité aux consommateurs des régions éloignées en raison de leurs caractéristiques supplémentaires de production d'énergie [70]. Cependant, la conception des sources d'énergie autonomes à petite échelle pour une utilisation dans des endroits éloignés ou hors réseau, n'a pas encore atteint une étape commercialement faisable [71].

Ces sources d'énergie alternatives qui sont propres, gratuites et renouvelables, possèdent un coût élevé d'achat et d'investissement, ce qui rend leurs croissances une tâche très lente. Diverses recherches ont été effectuées pour la conception optimale des systèmes hybride PV-

WT [72, 73], et durant ces dernières années les chercheurs spécialisés en énergie renouvelable, ont pu, avec de meilleures progressions de fabrication, diminuer leur coût, ce qui les a rendu plus attrayant.

Par ailleurs, diverses recherches ont été effectuées sur l'optimisation des systèmes d'énergie renouvelable hybrides [74-76]; aussi beaucoup de techniques ont été utilisées afin d'atteindre l'objectif d'optimisation [77-79]. Donc, le problème va être traité en répondant à la question suivante: en assurant la demande de la charge, quelle base et quelle structure seront les plus rentables ?

### 3.3 Définition de l'optimisation

Le terme "optimisation" peut être défini comme une recherche du minimum ou du maximum d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquelles les variables de la fonction à optimiser sont des contraintes évoluées dans une certaine partie de l'espace de recherche. Alors "optimiser" sert à minimiser ou maximiser une fonction en respectant certaine condition préalable. Cette fonction appelée « Objectif » peut être un coût à minimiser, profit à maximiser, production à maximiser...etc. Les fonctions « Objectifs » sont diverses ainsi que les contraintes, c'est selon le problème à optimiser.

### 3.4 Formulation d'un problème d'optimisation

Il faut noter d'une part que les problèmes réels produisent généralement de multiples caractéristiques de fonctionnement ou objectifs, qui doivent être optimisés conjointement. D'autre part, ceci n'est pas toujours faisable car les objectifs peuvent être conflictuels [80].

Minimiser  $f(x)$ : fonction à optimiser

Chercher le vecteur  $x^* = [x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*]^T$  qui satisfait les conditions suivantes:

Sous les contraintes :  $g(x) \leq 0$  : (m contraintes d'inégalité)

$$h(x) = 0 : (p \text{ contraintes d'égalité})$$

Avec  $x \in R^n$ ,  $g(x) \in R^m$ ,  $h(x) \in R^p$

Tel que:  $x$  exprime le vecteur des variables de décision dans l'espace de recherche  $\Omega$ .

L'espace de recherche occupé par les fonctions « Objectifs » appelé "l'espace des objectifs"; le sous-espace des fonctions "Objectifs" qui satisfait les contraintes s'appelle l'espace de recherche réalisable.

### 3.4.1 La fonction « Objectif »

C'est le nom donné à la fonction "f(x)", dans notre méthodologie la fonction "f(x)" est représentée par le coût total d'investissement (coût total de conception e, en anglais: the total design cost  $C_T$ ) dans un système hybride PV-WT-FC. Ce coût est déterminé par le coût d'achat des unités (total Capital cost  $C_{cpt}$ ) plus le coût total de maintenance (the total maintenance cost  $C_{Mtn}$ ). Pour minimiser le coût total  $C_T$  de conception la forme générale de la fonction « Objectif » devrait être exprimée comme suit:

$$f(x) = C_T = C_{cpt} + C_{Mtn} \quad (3.1)$$

### 3.4.2 Minimum global

On a la fonction  $f : \Omega \in R^n \rightarrow R$ , tel que  $\Omega \neq \emptyset$ . Pour  $x^* \in \Omega$ ,

On dit que  $x^*$  est un optimum global si et seulement si :  $\forall x \in \Omega : f(x^*) \leq f(x)$

Tel que:

- $x^*$  : l'optimum global.
- $F$  : la fonction "Objectif".
- $\Omega$  : La région faisable ( $\Omega \in s$ ).
- $s$  : l'espace de recherche global.

Le minimum global est illustré par le point M3 dans la Figure 2.1.

### 3.4.3 Minimum local

Un point  $x^*$  est un minimum local de la fonction  $f$  si et seulement si:

$$f(x^*) < f(x), \forall x \in V(x^*) \text{ et } x^* \neq x \quad (3.2)$$

Où  $V(x^*)$  définit un voisinage de  $x^*$ .

Deux minimums locaux sont illustrés dans la figure 3-1 (M1 et M2).

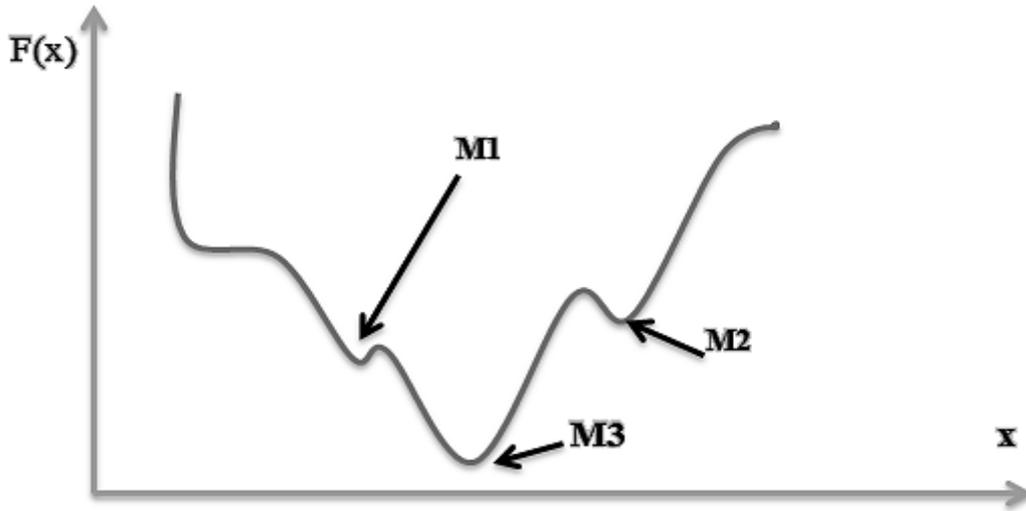


Figure 3-1 Illustration des différents minimums d'une fonction objectif

M3 est considéré comme un minimum global de la fonction illustré dans la figure 3-1.

### 3.5 Les contraintes

Les contraintes techniques imposées au système hybride proposé peuvent être citées comme suit:

$$\sum_l^{24} (P_{pv}^t \times \Delta t) + \sum_l^{24} (P_{wind}^t \times \Delta t) \geq \sum_l^{24} (P_{dmd}^t \times \Delta t) \quad (3.3)$$

$$\text{Total wattage installed} \leq \sum_d P_{inv} \times N_{inv} \quad (3.4)$$

$$\text{Photovoltaic maximum power STC} \leq \sum_e P_{contr} N_{contr} \quad (3.5)$$

$$P_{pv}^t = N_{pv} \times P_s^t \quad (3.6)$$

$$P_{wind}^t = N_{wind} \times P_w^t \quad (3.7)$$

$N_{pv}$ : Variable de décision, qui est le nombre des panneaux solaires.

$P_s^t$ : Puissance générée par chaque panneau solaire à l'instant t, peut être obtenue en utilisant les données d'ensoleillement et l'insolation et par la courbe de caractéristique [78].

$P_{wind}^t$ : Puissance générée par l'éolienne. L'énergie produite par chaque éolienne peut être obtenue en utilisant des données de vitesse du vent et la courbe de caractéristique de l'éolienne.

$N_{wind}$ : Variable de décision, qui est le nombre des éoliennes.

Pour calculer la puissance totale installée, on doit calculer la somme de toutes les puissances de la charge comme suit:

$$\text{total wattage installed} = \sum P_{\text{loads}} \quad (3.8)$$

$P_{\text{inv}}$  Puissance maximale qui peut être fournie par le convertisseur (Onduleur DC/AC) elle une variable de décision, qui représente le nombre des onduleurs requise.

### 3.6 Dimensionnement des panneaux solaires

Le coût initial de l'unité (Initial capital cost ICC) du système PV peut varier de 6000\$ par kW à 10.200 \$/kW [81, 82]. Dans ce travail, le modèle de Sunpower 210W pour un coût de 322 \$/panneau a été choisis, où la puissance maximale du PV est de 210W dans les conditions d'essai standard (STC: ensoleillement 1000W/m<sup>2</sup>, AM1.5 spectrium, la température ambiante 25°C).

Coût d'exploitation et de maintenance pour les générateurs photovoltaïque est considérée 0,5 cent/kWh et sa durée de vie est de 20 ans.

### 3.7 Dimensionnement des éoliennes

Une vaste gamme des éoliennes est disponible. Les coûts d'achat d'une unité pour une gamme d'éolienne est possible dans le commerce à partir de 1500 \$ pour la taille de 1KW à 3 500 000 \$ pour la taille de 1800 kW [83, 84]. Dans cette analyse, le coût de la turbine éolienne est considéré comme 17,681, 25kW, le modèle de "FutureEnergy-10kW" avec des pales d'un diamètre de 3-7.0m et une hauteur de 16 m a été utilisée. Les coûts d'exploitation et d'entretien de l'éolienne sont considérés 2 cents/kWh et sa durée de vie est de 20 ans.

### 3.8 Dimensionnement du convertisseur (Onduleur DC/AC)

Le coût du convertisseur des onduleurs peut varier de 200 \$ / kW à 6500 \$/kW ; le coût utilisé dans notre travail est de 3597 \$/kW, le modèle de 48 SET / 220-10kW a été choisi; la durée de vie a été estimée à 20 ans. L'efficacité de la conversion du courant continu en courant alternatif de la plupart des onduleurs de nos jours est de 90% ou plus. De nombreux constructeurs d'onduleurs prétendent avoir des rendements plus élevés, pour notre cas on prendra le rendement d'efficacité égale à 90%.

Dans le cas d'un système autonome le nombre des onduleurs peut être calculé comme suit:

$$N_{\text{inv}} = \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{inv}}} \quad (3.9)$$

Où  $P_{load}$  la puissance de la charge et  $P_{inv}$  est la puissance maximale qui peut être délivrée par l'onduleur.

### 3.9 Dimensionnement des batteries

Les accumulateurs "Surrette 12CS11Ps" (48V, 375 Ah) sont utilisés dans ce système. Le coût d'une batterie est de 1300\$ avec un coût de remplacement de 900 \$. Le dispositif de stockage peut contenir un certain nombre des batteries (0, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30 ou 32). L'utilisation de la capacité nominale de la batterie est de 80% et la capacité nominale de la batterie est 4.28 kW / h. La durée de vie de la "Surrette 12CS11Ps" est de 10 ans.

Le nombre des batteries peut être déterminé par la fonction suivante [78]:

$$N_{batt} = \text{Roundup} \left[ \frac{S_{req}}{\rho \times S_{batt}} \right] \quad (3.10)$$

$S_{batt}$  la capacité nominale de chaque batterie et  $\rho$  est l'usage de la capacité nominale qui garantit la durée de vie de la batterie.

$S_{req}$  la capacité de stockage nécessaire, qui peut être calculée par l'équation suivante:

$$S_{req} = \sum_{t=1}^{\max t} (P_{pv}^t + P_{wind}^t - P_{dmd}^t) \times \Delta t - \sum_{t=1}^{\min t} (P_{pv}^t + P_{wind}^t - P_{dmd}^t) \times \Delta t \quad (3.11)$$

$\max t$  est le moment où l'énergie produite sera au maximum;  $\min t$  est le moment où l'énergie produite sera la plus faible; et  $\Delta t$  est l'unité de temps (dans notre cas il est égale à 1 heure).

$P_{dmd}^t$  est la puissance demandé à l'instant t (en kW).

### 3.10 Dimensionnement du contrôleur MPPT

Le dimensionnement du système MPPT consiste à calculer le nombre de contrôleurs nécessaires pour le système photovoltaïque installé. Dans un petit système photovoltaïque un contrôleur peut être suffisant pour répondre à la demande, mais pour agrandir l'installation PV plusieurs contrôleurs sont essentiels pour répondre à la demande de la clientèle (charge). La tension nominale du contrôleur doit être égale à la tension nominale de la batterie. Aussi la tension du PV maximale devrait être inférieure à la tension nominale du contrôleur.

Le nombre de contrôleurs MPPT nécessaire peut être calculé par l'équation suivante:

$$N_{\text{contr}} = \frac{P_{\text{max pv}}}{P_{\text{max cptr}}} \quad (3.12)$$

Où,

$$P_{\text{max cptr}} = \text{photovoltaic maximum power STC} \times N_{\text{pv}} \quad (3.13)$$

$P_{\text{max cptr}}$  est la puissance maximale du contrôleur.

Par ailleurs, la puissance maximale du régulateur peut être calculée par la formule suivante:

$$P_{\text{max cptr}} = V_{\text{batt}} \times I_{\text{cptr}} \quad (3.14)$$

$V_{\text{batt}}$  La tension de la banque de la batterie et  $I_{\text{cptr}}$  est le courant maximal.

Cependant, le coût total d'achat de l'unité constituant le système hybride peut être compté par l'étude financière au début du projet, contrairement au coût d'entretien qui se produit le long de la vie du projet. Par conséquent, les coûts à des moments différents ne peuvent pas être directement comparés, donc des facteurs d'adaptation qui convertissent un coût monétaire dans des moments donnés à une valeur équivalente aux autres moments est utilisée [78, 85]. Le  $C_{\text{cpt}}$  est converti en coût annuelle à l'aide du facteur suivant:

$$C_{\text{conv}} = \frac{i(1+r)^L}{(1+r)^L - 1} \quad (3.15)$$

Où, (L) est la durée de vie du système et (r) est le taux d'intérêt annuel.

Le  $C_{\text{cpt}}$  dans l'équation. (3.1) peut être exprimée par la fonction suivante:

$$C_{\text{cpt}} = C_{\text{conv}} \times \sum_a C_{\text{pv}} \times N_{\text{pv}} + \sum_b C_w \times N_w + \sum_c C_{\text{batt}} \times N_{\text{batt}} + \sum_d C_{\text{inv}} \times N_{\text{inv}} + \sum_e (C_{\text{cptr}} \times N_{\text{cptr}}) + C_{\text{BG}} \quad (3.16)$$

Où  $C_{\text{pv}}, C_w, C_{\text{batt}}, C_{\text{inv}}, C_{\text{cptr}}, C_{\text{BG}}$  sont les coûts de panneau solaire, éolienne, batterie, convertisseur, contrôleur MPPT et la génératrice de backup respectivement.

En outre, le coût de maintenance dans l'équation (3.1) peut être:

$$C_{\text{Mtn}} = (C_{\text{mtn}}^{\text{pv}} \times \sum_t^{24} (P_{\text{pv}}^t \times \Delta t)) \times 365 + (C_{\text{mtn}}^{\text{wind}} \times \sum_t^{24} (P_{\text{wind}}^t \times \Delta t)) \times 365 \quad (3.17)$$

Où  $C_{mn}^{pv}$  est le coût de maintenance (par kWh) pour le système photovoltaïque; et  $C_{mn}^{wind}$  est le coût de maintenance (par kWh) pour éolienne.

### 3.11 Profile de charge

La consommation d'énergie est la puissance électrique absorbée par les charges dans une période de temps (exprimée en kWh). Les charges ont généralement la plus grande influence sur la taille et le coût d'un système composé d'éoliennes et panneaux solaires. Afin de réduire le coût du système WT-PV, il est nécessaire d'utiliser des charges plus efficaces, partiellement ou totalement éliminer les charges inutilisables.

Pour estimer la consommation d'énergie, il faut déterminer l'énergie électrique moyenne quotidiennement utilisée en wattheures ainsi que la puissance totale demandée en watts. Le système sera plus économique si des charges électriques efficaces de faible consommation d'énergie sont utilisées.

Pour calculer les kWh consommés pour un type de charge dans une journée:

$$\frac{\text{kWh}}{\text{Jour}} = \frac{N \times P_{\text{Load}} \times H_{\text{day}} \times D_{\text{week}}}{7} \quad (3.18)$$

Où N signifie la quantité d'un type spécifique de charge,  $P_{\text{load}}$  est la consommation de puissance du ce type de charge,  $H_{\text{day}}$  le nombre des heures durant lesquelles la charge consomme la puissance et  $D_{\text{week}}$  est le nombre de jours d'utilisation de la charge (durée d'une semaine).

Dans cette étude, la consommation d'énergie d'une maison proposée situé en Algérie est estimée. La maison se compose de trois chambres, une salle de bain, un salon et une cuisine.

Le tableau 3.1 montre les charges électriques et le kWh total que la maison consomme. L'énergie estimée de la maison proposée dans le tableau 3.1 est considérée comme la charge qui doit être alimentée par le système PV-WT.

Tableau 3.1 Estimation d'une consommation d'énergie d'une maison algérienne typique

<i>Les charges</i>	<i>qty × volts × amps = watts × utilisation × utilisation / 7 = watt.</i>							
	qty	volts	amps	ac-watt	hrs/Jours	Jours/Semaine	jours	ac- watt
Micro-ondes	1	220	9	1980	0,08	7	7	158,4
Réfrigérateur	1	220	1,3	286	8	7	7	2288
Micro portable	2	220	0,42	184,8	8	7	7	1478,4
TV plat lcd 46"	2	220	1,02	224	4	7	7	897,6
music Theater	1	220	3,47	763	1	4	7	436,2
Machine à laver	1	220	1,92	422,4	1	4	7	241,3
Lumières	14	220	0,17	37,4	4	7	7	149,6
imprimante	1	220	0,9	198	0,2	7	7	396
câble modem	1	220	0,08	17,6	12	7	7	211,2
Séchoir	1	220	10	2200	0,25	7	7	550
Climatiseur	1	220	2,41	5302	6	7	7	3181
cellular charge	2	220	0,11	24,2	4	7	7	96,8
Autre choses	/	/	/	/	/	/	/	200

### 3.12 Modèle optimal via les algorithmes génétiques (AG)

Dans la conception du dimensionnement optimal, il existe un grand nombre de variables et des paramètres qui doivent être prise en considération, donc le dimensionnement du système hybride PV-WT est beaucoup plus compliqué qu'un système de production d'énergie avec une source unique. Ce type d'optimisation comprend des objectifs économiques, par conséquent, et afin d'atteindre les configurations optimales du système pour la minimisation d'une fonction « Objectif » "coût", l'algorithme génétique (AG) est utilisé.

#### 3.12.1 Modèle via AG

L'AG est inspirée par la théorie de l'évolution pour justifier l'origine des espèces. Dans la nature, les espèces faibles et inaptes au sein de leur environnement sont confrontées à l'extinction par la sélection naturelle. Les plus forts ont une plus grande possibilité de transmettre leurs gènes aux futures générations via la reproduction, à long terme, les espèces portant la combinaison correcte dans leurs gènes deviennent dominants dans leur population. Parfois, lors de la lenteur du processus de l'évolution, des changements aléatoires peuvent se produire dans les gènes.

Donc, si ces changements offrent des avantages supplémentaires pour la survivance, de nouvelles espèces évoluent à partir des anciens. Les modifications non retenus sont éliminés par la sélection naturelle. Ces algorithmes donnent des solutions potentielles à un problème particulier sur un chromosome simple, comme la structure des données et l'application des opérateurs de recombinaison.

### **3.12.2 Méthodologie du dimensionnement optimal**

La figure 3-2 représente un schéma de bloc de la méthodologie d'optimisation utilisée pour la fonction cout en utilisant les AG.

L'algorithme d'optimisation a une base de données contenant les caractéristiques techniques et économiques (prix et les types) des dispositifs commerciaux utilisés dans le système avec leurs coûts de maintenance par unité qui leurs est associés.

Le type de module PV, type de turbine de système WT, la batterie avec une capacité nominale, type d'onduleur, etc., sont stockées dans la base de données d'entrée.

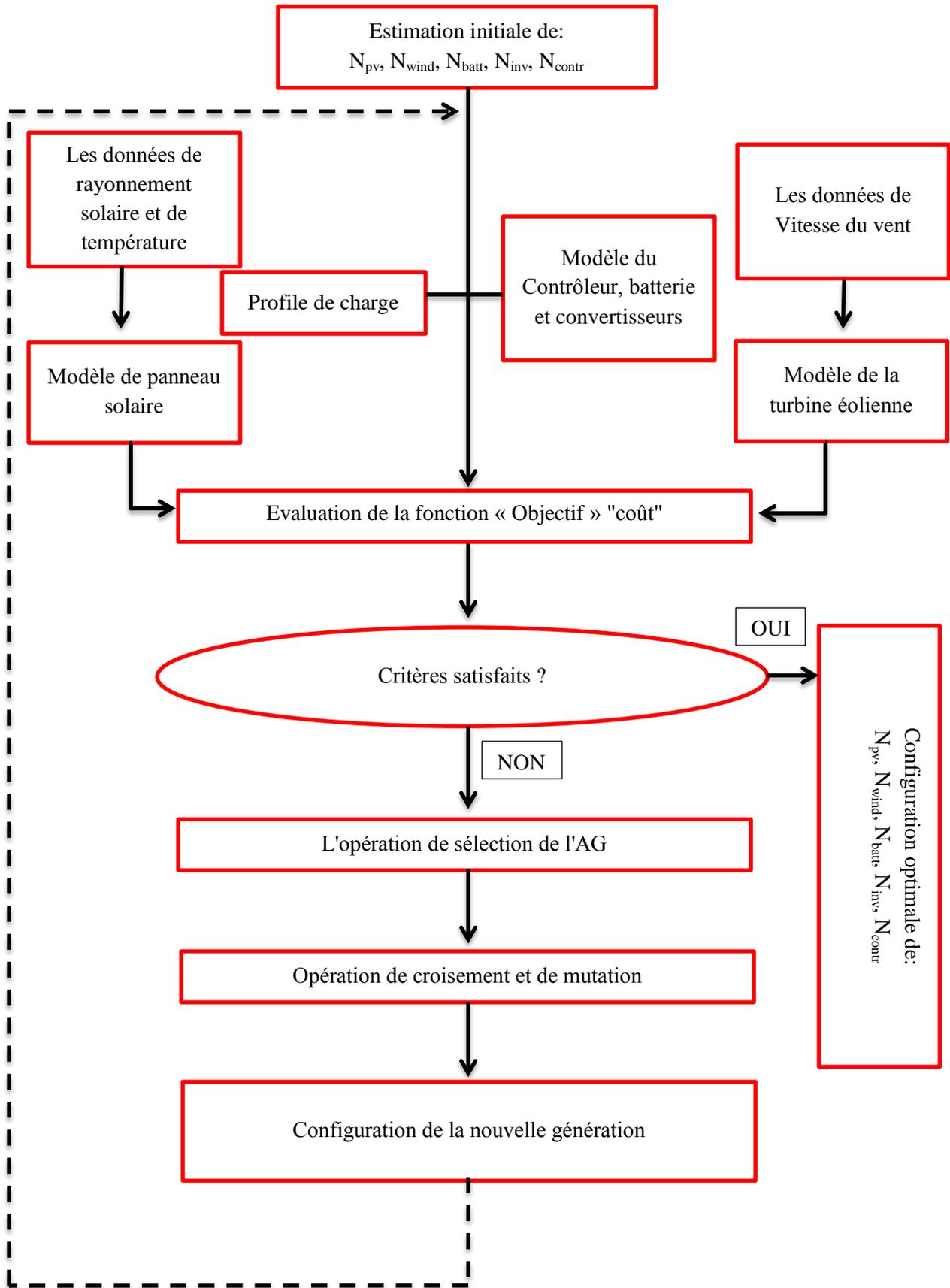


Figure 3-2 L'organigramme de la méthodologie du dimensionnement optimal proposée

La prochaine étape de la procédure de dimensionnement optimal consiste d'activer l'AG qui cherche dynamiquement la configuration du système, souvent; l'AG utilise trois opérateurs (sélection, croisement et mutation) pour imiter les processus de l'évolution naturelle.

La première étape de l'évolution génétique est de déterminer si la configuration du système choisi passe à l'évaluation fonctionnelle qui inclue les conditions d'alimentation de la demande de charge ainsi que les contraintes du système qui doivent être satisfaites par cette configuration choisie.

Une population composée par des chaînes de caractères (nommées chromosomes ou le génotype du génome), qui présente des solutions candidates (nommées individus) pour notre fonction "objectif" d'optimisation, il se développe pour trouver des meilleures solutions par la croissance du nombre des générations.

L'évolution commence généralement à partir d'une population d'individus donnés de façon aléatoire, et se produit au cours des générations. Dans ce travail, des nombres aléatoires sont estimés pour déterminer une population initiale. Les variables de décision ont été définies avec des valeurs spécifiées.

Dans chaque génération, le coût de la fonction « Objectif » (fitness) correspondant à chaque individu de la population est évalué, où plusieurs individus sont choisis de façon stochastique parmi la population traitée (basant sur leurs coûts), puis une modification sera établie (recombinée et mutée au hasard) pour former une nouvelle population.

La nouvelle population est ensuite utilisée dans la prochaine itération de l'algorithme (évalué et traité). La valeur la plus basse de coûts (plus basse valeur de la fonction « Objectif ») obtenue dans les itérations précédentes sera considérée comme la solution la plus optimale pour le problème de la minimisation.

Cette solution optimale est remplacée par des meilleures solutions, si d'autres solutions vont se produire dans les générations suivantes au cours d'évolution du programme, l'algorithme se termine lorsque soit un nombre maximum des générations a été abouti, ou un niveau satisfaisant de coûts pour la fonction « Objectif » est atteint.

### 3.13 Étude de cas : Ville de Biskra

La ville de Biskra (située au sud de l'Algérie) a été choisie comme une étude d'un cas . Les caractéristiques géographiques de la ville de Biskra peuvent être citées comme suit:

Latitude 34.4°N, longitude 5.7°E, Elévation 89m.

Les données de gisement solaire et vitesse de vent illustrées sur les figures ci-dessous sont obtenues d'après la source SODA et RETScreen.

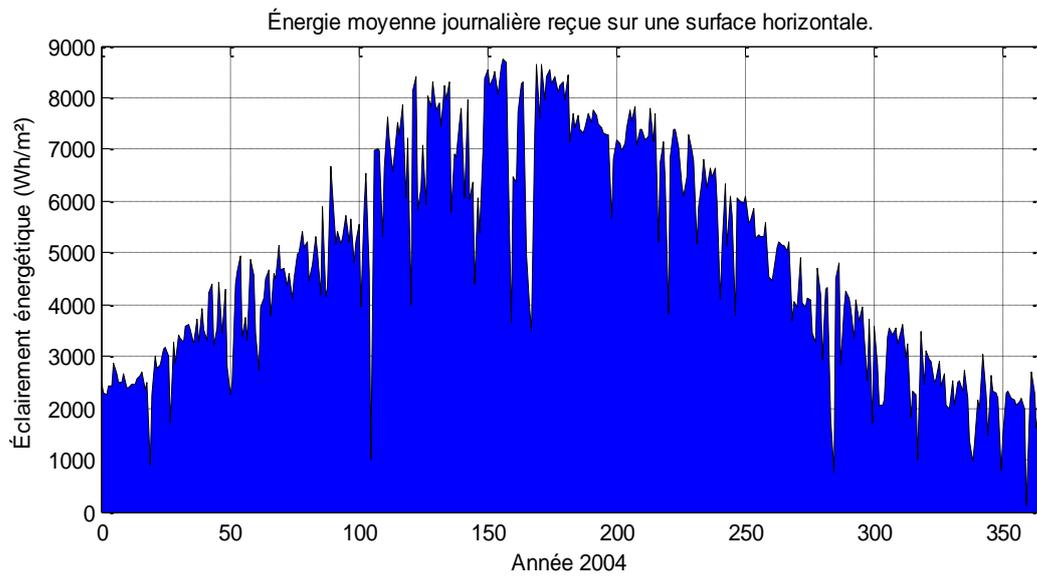


Figure 3-3 Energie moyenne journalière reçue sur une surface horizontale [ville de Biskra]

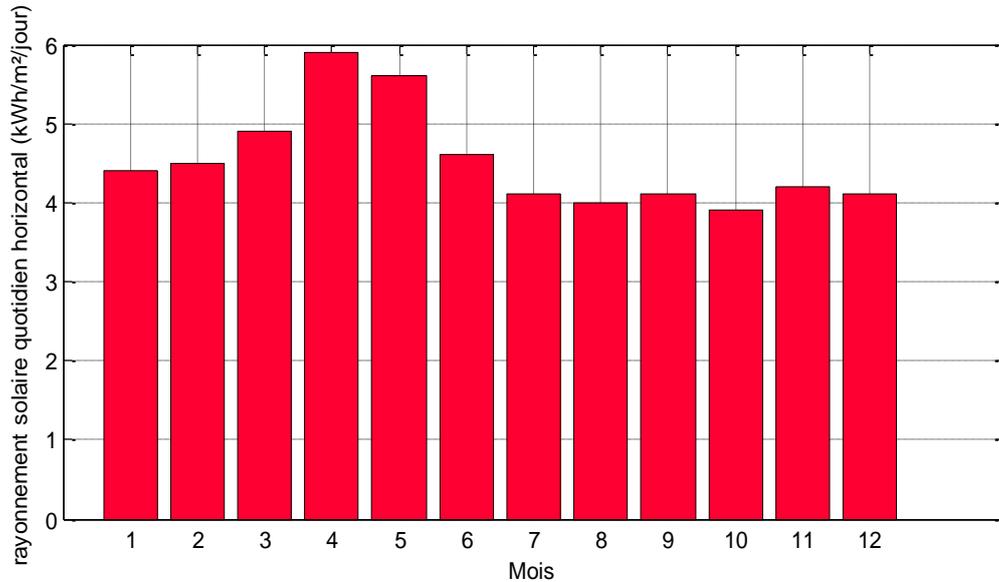


Figure 3-4 Rayonnement solaire mensuelle horizontal [ville de Biskra]

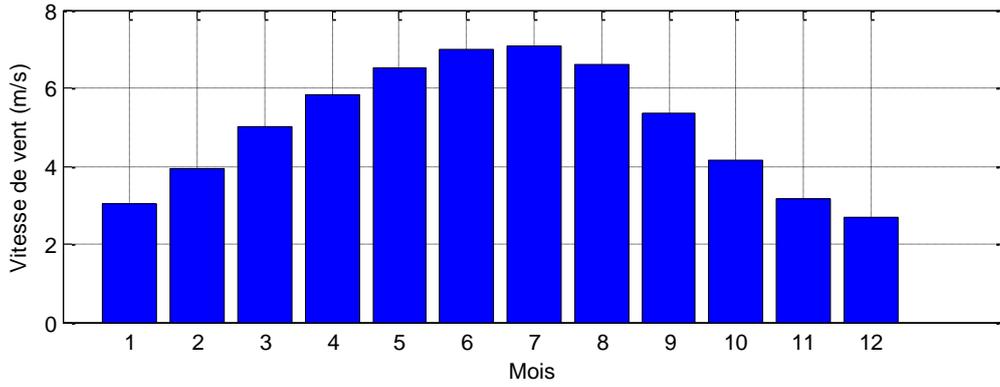


Figure 3-5 Vitesse de vent mensuelle (m/s) [ville de Biskra]

La distribution des besoins d'énergie des consommateurs pendant un jour est représentée sur la figure3-6.

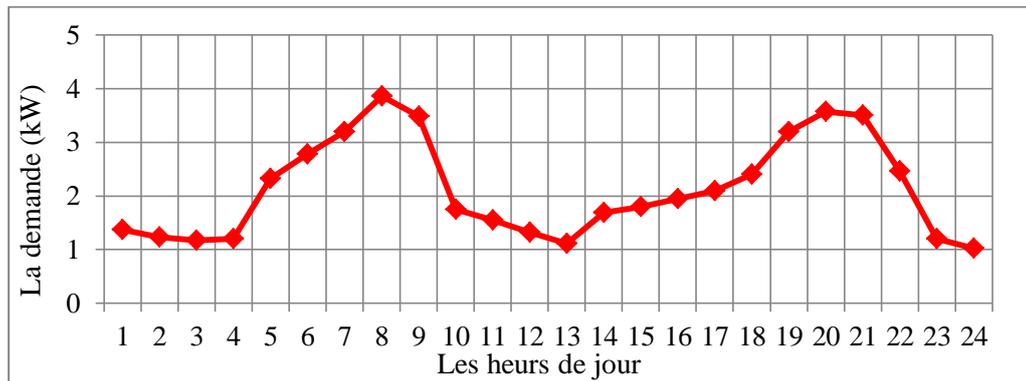


Figure 3-6 Profile de charge.

D'après le gisement solaire obtenu, la puissance électrique journalière qui peut être délivrée par chaque panneau solaire est calculée par l'équation suivante:

$$P_s^t = P_c \times \frac{1}{L} \times I_r \quad (3.19)$$

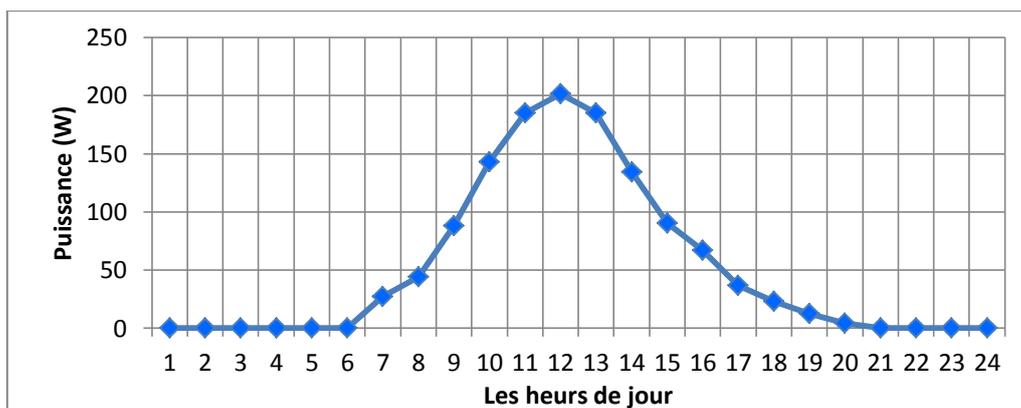


Figure 3-7 La puissance produite par un panneau solaire pendant une journée.

D'après la vitesse du vent, la puissance électrique journalière qui peut être délivrée par chaque éolienne solaire est calculée d'après l'équation (1.9).

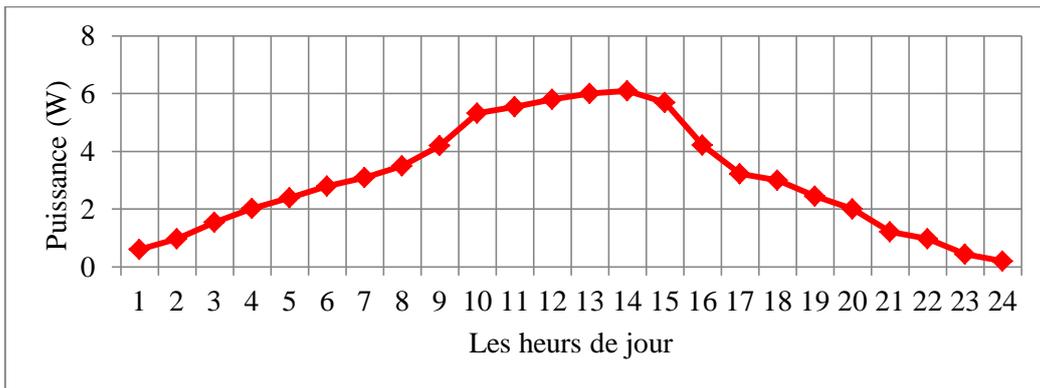


Figure 3-8 La puissance produite par l'éolienne pendant une journée.

### 3.14 Résultats des optimisations

La méthode proposée a été appliquée à la conception d'un système hybride PV-WT autonome afin de pouvoir alimenter une charge AC. Les paramètres de la méthode GA proposés pour le système sont détaillés ci-dessous:

Tableau 3.2 Paramètres utilisés pour l'AG

Probabilité de croisement	0.9
Probabilité de Mutation	0.08
Méthode de sélection	“Roulette”
Nombre de Générations	100
Taille de Population	80
Méthode de croisement	Deux points
type de variables	Entier

L'irradiation solaire sur plan horizontal durant une année, ainsi que la puissance moyenne horaire générée par un panneau solaire dans une journée et la puissance moyenne horaire générée par le WT, respectivement sont tracées sur la figure 3-3, 3-7 et 3-8.

Les systèmes hybrides PV-WT répondent généralement bien au besoin énergétique de la charge grâce à la bonne conversion complémentaire de l'irradiation solaire et la vitesse du vent.

Dans le premier dimensionnement, quand l'exemple a été résolu avec des contraintes de limitation des ressources du générateur WT, la solution optimale pour le coût du système était 14,938.66US\$, avec  $N_{wind} = 0$ .

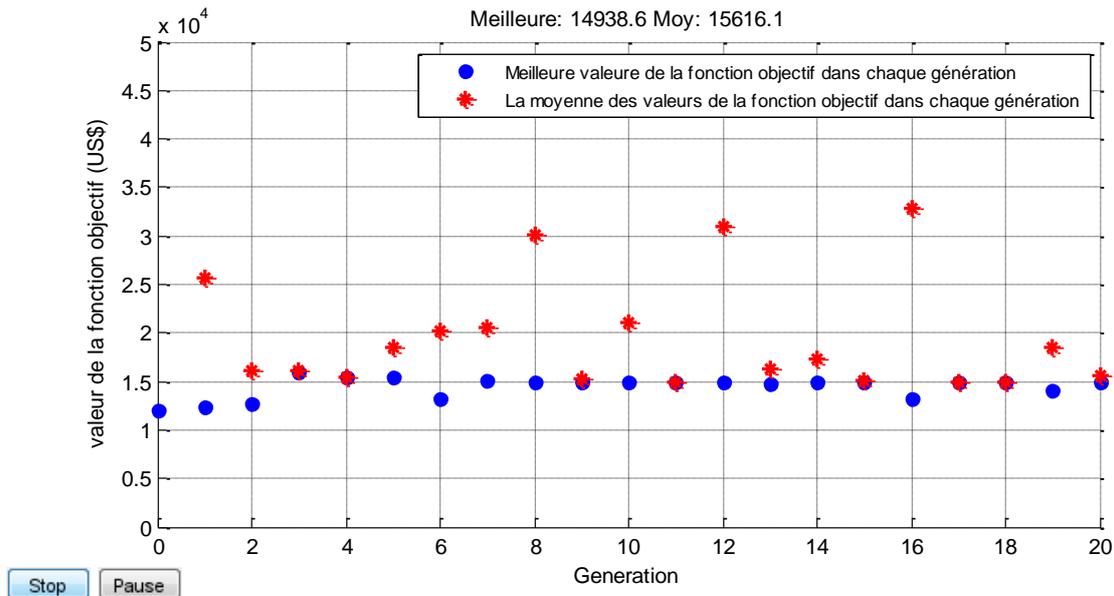


Figure 3-9 Valeur de la fonction "objectif" [Premier dimensionnement]

Par conséquent, dans le deuxième dimensionnement; Pour pouvoir utiliser des turbines éoliennes, les contraintes suivantes peuvent être ajoutées à la formulation:  $N_{wind} = 1$ .

Avec cette contrainte, un coût minimal du système a été obtenu: 12,466.55US\$ et les vecteurs correspondant aux configurations optimales sont résumés sur le tableau (3-3).

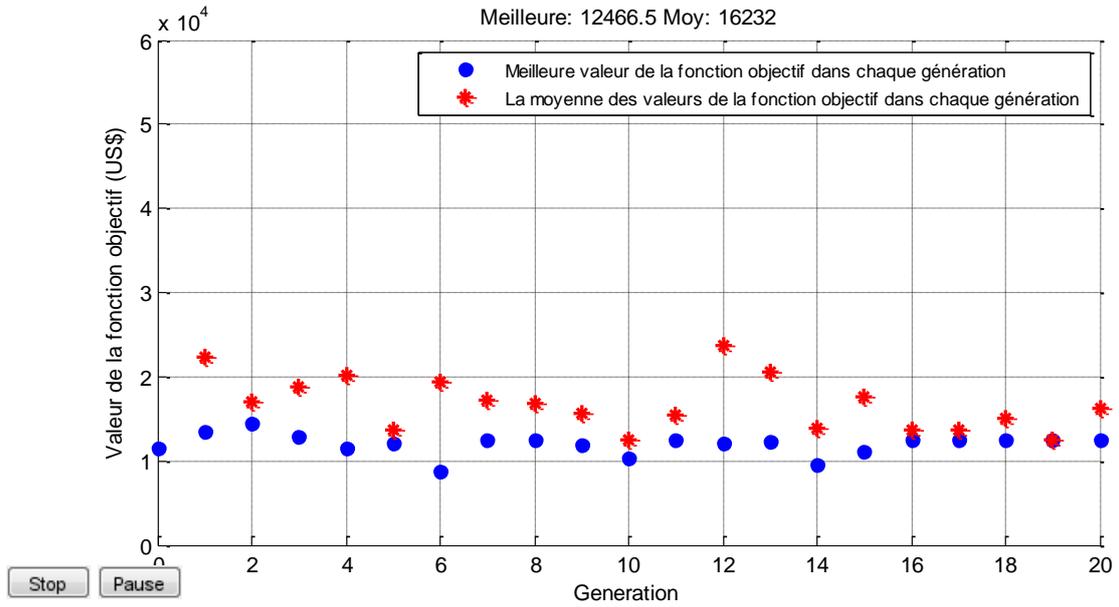


Figure 3-10 Valeur de la fonction objectif [Deuxième dimensionnement]

Tableau 3.3 Les résultats du dimensionnement optimal pour le système PV-WT.

Type de variable	Valeur (1 <sup>er</sup> dimensionnement)	Valeur (2 <sup>eme</sup> dimensionnement)
PV	162	42
WT	0	2
Contrôleur MPPT	49	14
Batteries	40	43
Onduleurs	1	1
Coût total US\$	<b>14,938.66</b>	<b>12,466.55</b>

Dans le troisième dimensionnement, l'exemple a été résolu avec des contraintes de limitation des ressources du générateur PV, la solution optimale ( $N_w = 4$   $N_{batt} = 58$   $N_{inv} = 1$ ) est trouvée avec un coût optimal de 16,959.77 US\$.

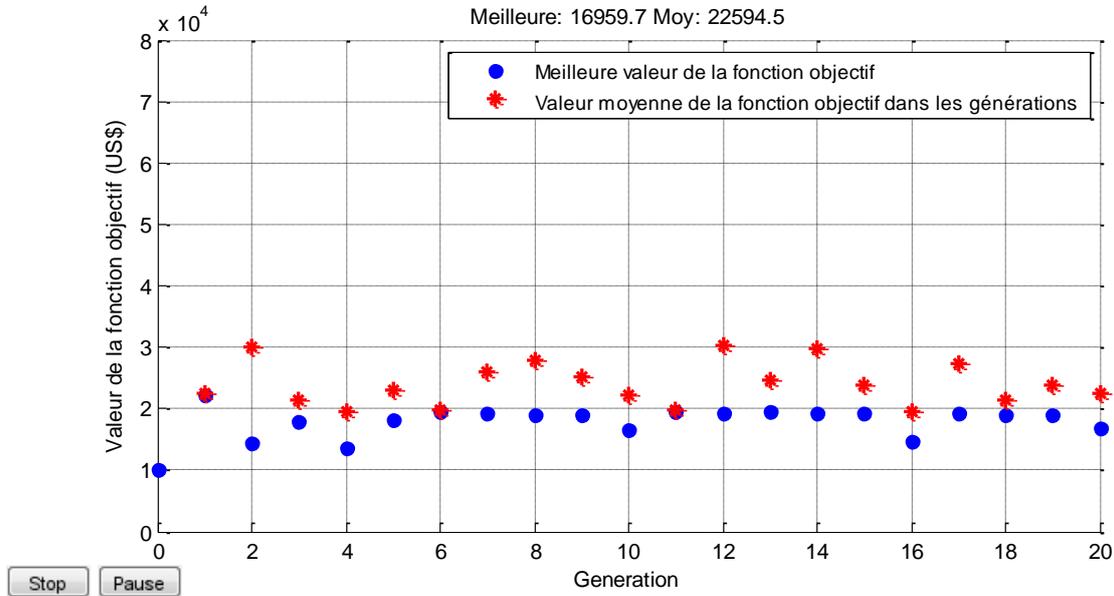


Figure 3-11 Résultats d'optimisation par AG [limitation des ressources du générateur PV]

Il est évident que dans les deux cas (premier et le troisième), les configurations optimales se traduisent par un coût annualisé supérieur par rapport au cas où nous avons utilisé une hybridation entre le générateur solaire et l'éolienne (dans le deuxième dimensionnement).

Pareillement, afin de faire une optimisation plus réaliste pour le problème coût de notre système proposé, la puissance de sortie du vent a été réduite en 75% de sa puissance originale comme suit:

$$P_w^t = 0.75 \times P_w^t \tag{3.20}$$

Le vecteur de la solution optimale était comme suit :

Tableau 3.4 Les résultats dimensionnement optimal pour le système PV-WT (3ieme cas).

Type de variable	PV	WT	Contrôleur MPPT	Batterie	Onduleur	Coût total US\$
valeur	11	3	4	37	1	<b>12,177.6</b>

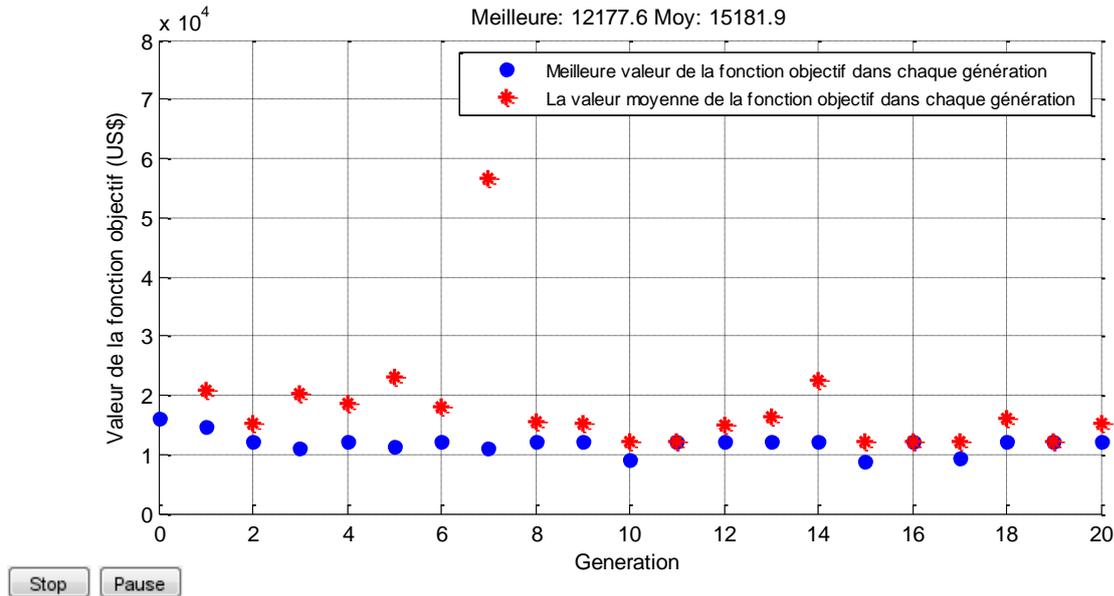


Figure 3-12 Valeur de la fonction objectif [Troisième dimensionnement]

### 3.15 Hybridation Photovoltaïque+ éolienne+ pile à combustible

Dans la partie précédente, nous avons présenté une procédure d'optimisation capable de concevoir un système hybride photovoltaïque – éolienne pour les applications autonomes, destinées au SG, tout en utilisant l'approche des algorithmes génétique (AG) afin de trouver le moyen le plus efficace d'utiliser le vent, l'énergie solaire et les batteries de stockage avec le coût le plus bas possible.

Il est clair que la nature intermittente et la dépendance aux changements climatiques représentent l'inconvénient majeur des systèmes solaires et des systèmes éoliens [86]. Par conséquent, ces deux types de systèmes peuvent être consolidés par des piles à combustible comme source de production secondaire, des batteries de stockage et des Supercondensateurs comme des dispositif auxiliaire à haute densité de puissance et dynamique élevée, afin de répondre à l'exigence de la demande de charge pendant la durée de vie du système, où les pics du courant sont ordinairement importants dans les micro smart grid (branchement de nouvelles charges ; par exemple démarrage des machines, chargement de véhicules électriques...etc.)

Habituellement, les systèmes hybrides qui contiennent plus d'une source de production peuvent être considérées comme des systèmes efficaces, puisque deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables sont nécessaires pour assurer un système fiable et une énergie économique[87].

Parmi les applications de la pile à combustible est la cogénération. Dans ce travail, et afin d'augmenter la fiabilité d'un système de production autonome destiné à l'utilisation dans les micros smart grid, un Co-générateur FC a été ajouté; un type de PEM de 5kW est choisie.

Dans le domaine de l'optimisation, cette étape présente un grand défi pour les décideurs et les opérateurs qui implémentent ce genre de systèmes hybrides, par ailleurs pour assurer une grande fiabilité d'un système hybride de nature intermittente, un Co-générateur sera nécessairement ajouter. Les prix des piles à combustible PEM de la gamme 5kW varient entre 18,000.00 et 22,000.00US\$.

### **3.16 Les supercondensateurs dans un système hybride autonome**

Des changements dans la conception et même le dimensionnement sont parfois nécessaires dans les systèmes autonomes hybrides pour répondre aux besoins énergétique de chaque application, c'est pour cela que les systèmes hybrides destinés au micro smart grid peuvent être équipés par des supercondensateurs afin d'augmenter l'efficacité, la fiabilité et pour avoir un système plus dynamique répondant aux divers variations de charge, cependant le prix élevé des supercondensateurs présente un obstacle énorme dans le côté "optimisation économique", d'où l'opérateur doit répondre à chaque fois sur la question: prix bas ou bien une grande fiabilité ?

### **3.17 Conclusion**

Dans ce chapitre, une méthodologie pour le dimensionnement optimal des systèmes hybrides PV-WT pour une application autonome a été représentée. Les algorithmes génétiques ont été employés comme une méthode d'optimisation. Le but de la méthodologie proposée est la sélection du nombre optimal des unités de notre système hybride afin de démontrer la rentabilité de ce genre de systèmes.

Le nombre optimal de chaque composant du système est calculé de telle sorte que le coût total du système est minimisé sous une contrainte de satisfaction de la charge. Le coût total du système d'une durée de vie de 20 ans était considéré comme une somme de coût d'achat initial de différents composants ainsi que le coût de maintenance des sources. Les AG ont été choisies grâce à leur aptitude d'atteindre l'optimum global avec simplicité et leur capacité de traité les problèmes technico-économique complexe.

La méthode proposée a été appliquée à la conception d'un système hybride de production d'énergie PV-WT pour alimenter une charge domestique. Les résultats vérifient que les systèmes hybrides PV-WT sont plus rentables que les systèmes de production qui utilisent qu'une seule source renouvelable. L'ajout d'une pile à combustible comme une source de backup peut rendre le système hybride plus fiable.

# Chapitre 4

## Gestion de l'énergie et commande du système

## 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, la conception du dimensionnement optimal et la rentabilité de notre système hybride ont été étudiées, en extrayant le nombre optimal des unités, ainsi que le coût d'investissement total correspondant.

On s'intéresse dans ce chapitre à la gestion de l'énergie entre les différentes sources constituant notre système hybride, où nous allons présenter la modélisation des convertisseurs de l'interfaçage (DC/DC non-isolé) entre les sources de productions et le bus continu, la modélisation par "moyen en petit signaux" a été utilisée pour chaque convertisseur, afin de prendre en considération leurs non-linéarités dues aux interrupteurs de puissance et autres composants du circuit où "moyen en petits signaux" a été examiné en écrivant les équations des convertisseurs (DC/DC non-isolé: Boost & les Buck-Boost) proposé dans les intervalles de fonctionnement  $DT$  et  $(1-D)T$ .

D'autre part, on présentera dans ce chapitre, une commande basée sur la notion de platitude dans lequel une boucle d'énergie est utilisée pour contrôler le flux d'énergie dissipé par les différentes sources installées (gestion de l'énergie), pareillement nous présenterons la boucle de courant associé au contrôleur plat qui est basé sur un régulateur par mode glissant, de type non linéaire, pour tous les convertisseurs agrégé au bus continu. Cette structure de commande nous permettra d'obtenir de bonnes performances dynamiques pour notre système hybride. La commande proposée réalisée par simulation a été validée expérimentalement, en utilisant un prototype à tension réduite (tension de sortie de bus continue), selon le matériel disponible au sein de notre laboratoire de modélisation des systèmes énergétiques (LMSE) de l'université Mohamed khider de Biskra, dans le but de garantir le déroulement raisonnable et le bon fonctionnement de la structure du contrôle proposé.

## 4.2 Modélisation des convertisseurs associés au système hybride

Dans cette étude nous avons utilisé le modèle dynamique de modélisation par moyen en petits signaux [22, 88] pour des raisons de performances et pour engendrer des commandes appropriées des convertisseurs associés. Pour notre travail des convertisseurs de type DC/DC Boost, et Buck-Boost sont utilisé, sachant qu'ils sont les plus utilisés selon la littérature.

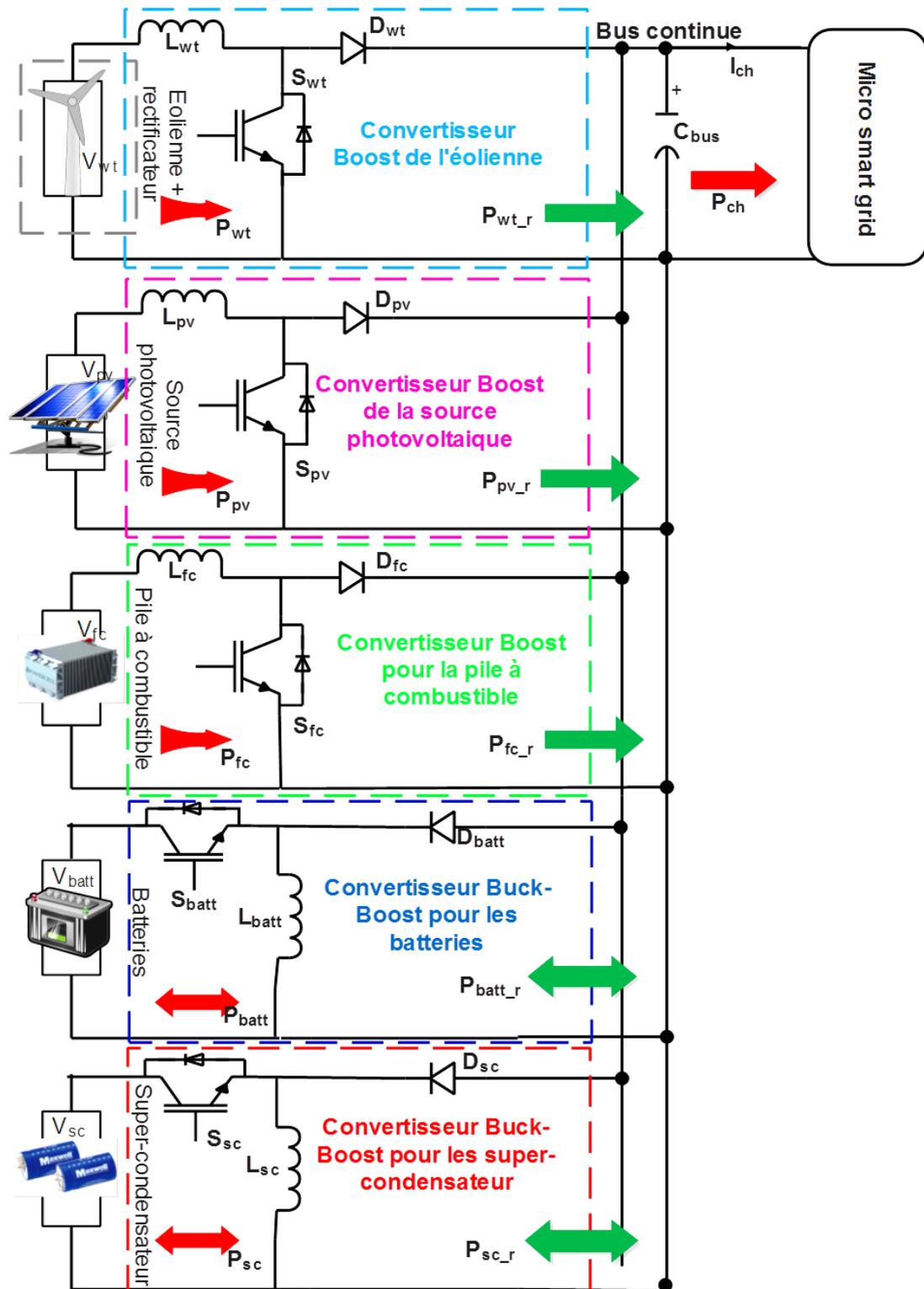


Figure 4-1 Architecture du système hybride autonome.

Les équations modélisant le convertisseur Boost par moyen en petits signaux peuvent être déterminées comme suit:

1) On trace l'architecture d'un convertisseur Boost:

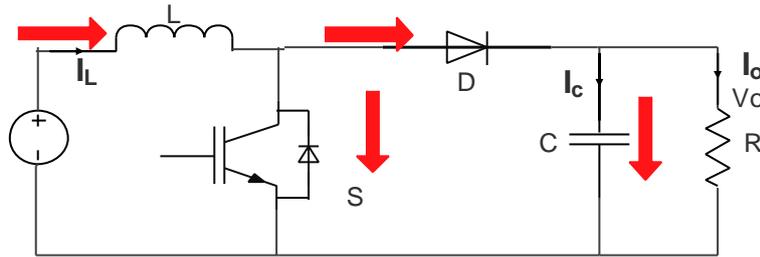


Figure 4-2 Architecture d'un convertisseur Boost idéal.

2) Pour une première étape on suppose les hypothèses suivantes:

2-1) Les composants sont idéales et sans perte

2-2) mode de conduction continue (CCM)

Grâce à l'hypothèse idéale,  $V_c = V_o$ , par conséquent une variable peut remplacer l'autre.

3) On écrit les équations d'état pour chaque intervalle de fonctionnement:

3-1) Interrupteur S ouvert,

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} \quad (4.1)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o}{R} \quad (4.2)$$

3-2) Interrupteur S fermé,

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} - v_o \quad (4.3)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = i_L - \frac{v_o}{R} \quad (4.4)$$

3-3) Équations d'état pour le cycle de commutation:

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} - (1-d)v_o \quad (4.5)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = (1-d)i_L - \frac{v_o}{R} \quad (4.6)$$

3-4) Présentation de perturbation dans les variables d'état de tel sorte que:

$$i_L = I_L + \hat{i}_L \quad v_{in} = V_{in} + \hat{v}_{in} \quad d = D + \hat{d} \quad (4.7)$$

$$L \frac{d(I_L + \hat{i}_L)}{dt} = (V_{in} + \hat{v}_{in}) - (1-D - \hat{d})(V_o + \hat{v}_o) \quad (4.8)$$

$$C \frac{d(V_0 + \hat{v}_0)}{dt} = (1 - D - \hat{d})(I_L + \hat{i}_L) - \frac{(V_0 + \hat{v}_0)}{R} \quad (4.9)$$

3-5) Par suite, on procède avec les équations AC et on obtient:

$$\begin{aligned} L \frac{d\hat{i}_L}{dt} &= \hat{v}_{in} - (1 - D) \cdot \hat{v}_0 + V_0 \cdot \hat{d} \\ C \frac{d\hat{v}_0}{dt} &= (1 - D) \hat{i}_L - I_L \cdot \hat{d} - \frac{\hat{v}_0}{R} \end{aligned} \quad (4.10)$$

3-6) Par le passage à la transformation de Laplace:

$$\begin{aligned} s \cdot L \cdot \hat{i}_L(s) &= \hat{v}_{in}(s) - (1 - D) \cdot \hat{v}_0(s) + V_0 \cdot \hat{d}(s) \\ s \cdot C \cdot d\hat{v}_0(s) &= (1 - D) \cdot \hat{i}_L(s) - I_L \cdot \hat{d}(s) - \frac{\hat{v}_0(s)}{R} \end{aligned} \quad (4.11)$$

3-7) Et on peut écrire:

$$\begin{aligned} s \cdot L \cdot \hat{i}_L(s) + (1 - D) \cdot \hat{v}_0(s) &= \hat{v}_{in}(s) + V_0 \cdot \hat{d}(s) \\ (1 - D) \cdot \hat{i}_L(s) - (s \cdot C + \frac{1}{R}) \hat{v}_0(s) &= I_L \cdot \hat{d}(s) \end{aligned} \quad (4.12)$$

3-8) Passant vers le mode matricielle, on obtiens:

$$\begin{bmatrix} sL & 1 - D \\ 1 - D & -(sC + \frac{1}{R}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{i}_L(s) \\ \hat{v}_0(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 \\ I_L \end{bmatrix} \cdot \hat{d}(s) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{v}_{in}(s) \quad (4.13)$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L(s) \\ \hat{v}_0(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL & 1 - D \\ 1 - D & -(sC + \frac{1}{R}) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ I_L \end{bmatrix} \cdot \hat{d}(s) + \begin{bmatrix} sL & 1 - D \\ 1 - D & -(sC + \frac{1}{R}) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{v}_{in}(s) \quad (4.14)$$

3-9) Par conséquent, la fonction de transfert pour le signal de contrôle à la tension de sortie:

$$\frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(1 - D) \cdot V_0 - (LI_L)s}{(LC)s^2 + \frac{L}{R}s + (1 - D)^2} \quad (4.15)$$

3-10) La fonction de transfert pour le signal de control au courant d'entrée:

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(CV_0)s + 2(1 - D) \cdot I_L}{(LC)s^2 + \frac{L}{R}s + (1 - D)^2} \quad (4.16)$$

3-11) La fonction de transfert pour le courant à la tension de sortie:

$$\frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{(1 - D) \cdot V_0 - (LI_L)s}{(CV_0)s + 2(1 - D)I_L} \quad (4.17)$$

Les équations modélisant le convertisseur Buck-Boost par moyen en petits signaux peuvent être déterminées comme suit:

1) On trace l'architecture d'un convertisseur Buck-Boost:

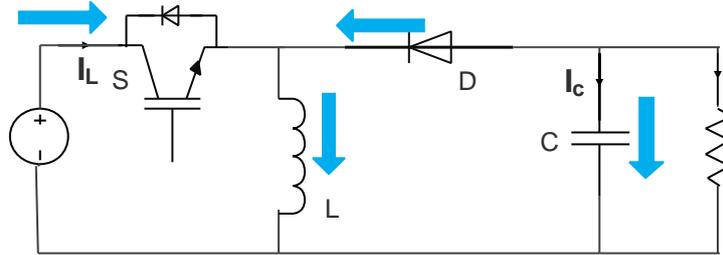


Figure 4-3 L'architecture d'un convertisseur Buck-Boost idéal.

2) Les interrupteurs sont ouverts et fermés successivement avec un taux de fréquence de commutation bien défini, le transistor est sur « on », la diode est éteinte, en train de s'inverser biaisée. Donc la tension d'entrée, appliquée directement à l'inductance L, détermine un courant ascendant linéaire, le condensateur est déchargé dans le circuit de charge ; lorsque le transistor est éteint, la charge est alimentée par le filtre LC [89].

3) La sortie qui en résulte est une tension régulée de grandeur inférieure ou supérieure à l'entrée tension, en fonction de la valeur du cycle de service, mais il a une polarité inverse. Le convertisseur sera analysé en fonction de l'état « on » ou « off » des interrupteurs[90].

3-1) Interrupteur S ouvert.

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} \quad (4.18)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = I_L - \frac{v_o}{R} \quad (4.19)$$

3-2) Interrupteur S fermé,

$$L \frac{di_L}{dt} = v_o \quad (4.20)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = i_L - \frac{v_o}{R} \quad (4.21)$$

3-3) Équations d'état pour le cycle de commutation:

$$L \frac{di_L}{dt} = d.v_{in} + (1-d)v_o \quad (4.22)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = -(1-d)i_L - \frac{v_o}{R} \quad (4.23)$$

3-4) Présentation de perturbation dans les variables d'état comme suit:

$$i_L = I_L + \hat{i}_L \quad v_{in} = V_{in} + \hat{v}_{in} \quad d = D + \hat{d} \quad (4.24)$$

3-5) On trouve que:

$$\begin{aligned} L \frac{d\hat{i}_L}{dt} &= D.\hat{v}_{in} - (1-D).\hat{v}_0 + V_0.\hat{d} \\ C \frac{d\hat{v}_0}{dt} &= -(1-D)\hat{i}_L + I_L.\hat{d} - \frac{\hat{v}_0}{R} \end{aligned} \quad (4.25)$$

3-6) Passant vers le mode matricielle et la transformation de Laplace, on retrouve les fonctions de transfert, de la tension de sortie au signal de commande:

$$\frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{1 - \frac{DL}{R(1-D)^2}}{1 + \frac{L}{R(1-D)^2}s + \frac{LC}{(1-D)^2}s^2} \quad (4.26)$$

3-7) La tension de sortie au courant d'inductance:

$$\frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{i}_L(s)} = R \frac{1-D}{1+D} \cdot \frac{1 - \frac{D.L}{R(1-D)^2}s}{1 + \frac{RC}{(1+D)}s} \quad (4.27)$$

Où  $\tilde{v}_{in}$ ,  $\tilde{i}_L$ ,  $\tilde{d}$  sont des petites perturbations autour de leurs points de fonctionnements.

### 4.3 Modèle mathématique du système hybride

Le modèle mathématique des convertisseurs Boost et Buck-Boost associés au panneau photovoltaïque, pile à combustible, éolienne et les systèmes de stockage, ainsi que le modèle du bus continu sont donnés dans l'équation suivante:

Les équations modélisant le convertisseur Boost associé à la source éolienne, photovoltaïque et la pile à combustible par le modèle moyen:

$$\begin{cases} L_{WT} \frac{dI_{WT}}{dt} = V_{WT} - (1 - U_{WT})V_{bus} - r_{WT}I_{WT} \\ I_{WT} = I_{LWT} \end{cases} \quad (4.28)$$

Le  $V_{WT}$  peut être obtenu par le redresseur intermédiaire AC / DC utilisé pour ajuster et réguler la tension produite par l'éolienne.

$$\begin{cases} L_{PV} \frac{dI_{PV}}{dt} = V_{PV} - (1 - U_{PV})V_{bus} - r_{PV}I_{PV} \\ I_{PV} = I_{LPV} \end{cases} \quad (4.29)$$

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} = V_{FC} - (1 - U_{FC})V_{bus} - r_{FC}I_{FC} \\ I_{FC} = I_{LFC} \end{cases} \quad (4.30)$$

Les équations modélisant le convertisseur Buck-Boost associé à la batterie et les supercondensateurs par modèle moyen:

$$\begin{cases} L_{\text{Batt}} \frac{dI_{\text{batt}}}{dt} = V_{\text{Batt}} - (1 - U_{\text{Batt}})V_{\text{bus}} - r_{\text{Batt}} I_{\text{Batt}} \\ V_{\text{Batt}} = E_0 - V_{\text{cb}} - R_{\text{Batt}} I_{\text{LBatt}} \end{cases} \quad (4.31)$$

$$\begin{cases} L_{\text{sc}} \frac{dI_{\text{sc}}}{dt} = V_{\text{sc}} - (1 - U_{\text{sc}})V_{\text{bus}} - r_{\text{sc}} I_{\text{sc}} \\ C_{\text{sc}} \frac{dV_{\text{sc}}}{dt} = -I_{\text{sc}} \end{cases} \quad (4.32)$$

Le bus continu est modélisé par l'équation suivante:

$$\left\{ \begin{aligned} C_{\text{bus}} \frac{dV_{\text{bus}}}{dt} = & -I_{\text{Load}} + (1 - U_{\text{Batt}})I_{\text{Batt}} + (1 - U_{\text{sc}})I_{\text{sc}} + (1 - U_{\text{PV}})I_{\text{LPV}} \\ & + (1 - U_{\text{FC}})I_{\text{LFC}} + (1 - U_{\text{WT}})I_{\text{LWT}} \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

Où  $U_{\text{Batt}}$ ,  $U_{\text{sc}}$ ,  $U_{\text{PV}}$ ,  $U_{\text{WT}}$  et  $U_{\text{FC}}$  sont les signaux de contrôle de la batterie, supercondensateur, la source photovoltaïque, l'éolienne et le convertisseur de la pile à combustible.  $I_{\text{batt}}$ ,  $I_{\text{sc}}$ ,  $I_{\text{pv}}$ ,  $I_{\text{wt}}$ ,  $I_{\text{fc}}$  sont successivement les courants de la batterie, supercondensateur, la source photovoltaïque, l'éolienne et la pile à combustible.  $C_{\text{bus}}$  est le condensateur du bus continu.

#### 4.4 Stratégie de commande du système hybride proposé

Pour définir une stratégie de commande convenable au système hybride, il est essentiel d'établir les principaux objectifs de contrôle, dont les objectifs de commande pour le système hybride constitué des éoliennes, panneaux photovoltaïques, pile à combustible, des batteries de stockage et des supercondensateurs peuvent être déterminé comme suit:

- La tension de bus continu doit être ajustée et régulée pour chaque instant, et pour diverses variations continues de la charge alimentée.
- La puissance demandée par la charge doit être satisfaite à chaque instant.
- Les systèmes de stockage (les batteries et les supercondensateurs) doivent être chargés.
- Assurer la stabilité et les performances dynamiques, quand le système fonctionne en boucle fermée et pour n'importe quelle perturbation ou défaillance dans le système.

- La puissance produite par le système hybride doit être générée d'une façon ordinaire, commençant par les sources principales (les panneaux photovoltaïque et l'éolienne), ensuite la source secondaire (la pile à combustible) et finalement les batteries de stockage.

#### 4.4.1 Notion de la commande par platitude

La platitude d'un système est un concept relativement récent en automatique, qui a été proposé et développé, depuis 1992, par M. Fliess, J. Lévine, P. Martin et P. Rouchon[91]. La propriété de platitude ouvre une démarche pour le paramétrage du comportement dynamique des systèmes physiques ou des processus. elle est donc fondée sur la description et la mise en évidence d'un ensemble de variables fondamentales du système, qui représentent ses sorties plates[92]. L'une des premières étapes de la commande par platitude comprendra une génération d'une trajectoire désirée adéquate au modèle du système; ensuite, et comme deuxième étape, la commande par platitude implique une conception d'un contrôle par bouclage acquiesçant la poursuite de cette trajectoire. D'autre part, elle sert fondamentalement à compenser les erreurs intrinsèques à toute modélisation par le principe de base de la boucle de rétroaction[92].

D'autre part, l'avantage de cette approche est que les trajectoires des systèmes sont totalement estimés par les trajectoires de ses sorties plats et ses dérivée sans inclure les équations différentielles [7, 93]. Actuellement, ces idées ont été récemment utilisées dans une variété de systèmes non-linéaires à travers différents disciplines d'ingénierie tels que le véhicule hybride, le contrôle de robot et les systèmes hybrides de production par des énergies renouvelables.

Aussi, les systèmes plats sont appropriés dans des situations où une claire génération de trajectoire est nécessaire. Le comportement des systèmes plats peut être exprimés par ses sorties. Subséquemment, il est possible de concevoir la trajectoire désirée des sorties et de déterminer le système de contrôle.

Grosso modo, un système plat est un système dans lequel toutes les variables d'état et les variables de contrôle peuvent être exprimées en termes de trajectoire de sortie et un nombre illimité de ses dérivées sans intégration d'aucune équation différentielle [94].

Un système d'équations différentielles classiques est supposé être différentiellement plat s'il peut être modélisé comme suit:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \quad u \in \mathbb{R}^m \\ x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad x \in \mathbb{R}^n \\ Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_m]^T \quad Y \in \mathbb{R}^m \end{cases} \quad (4.34)$$

$x$  est le vecteur des variables,  $u$  est le signal d'entrée de commande,  $Y$  est le vecteur des sorties plates et  $(n, m) \in \mathbb{N}^2$ .

Le vecteur  $Y$  peut être écrit en fonction de  $x$  et  $u$  comme suit[95] :

$$Y = \phi(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(s)}) \quad (4.35)$$

Où  $(s)$  est le nombre déterminé des dérivés.

Les vecteurs  $x$  et  $u$  peuvent être exprimés en utilisant les vecteurs de sorties plats  $Y$ , et nombre fini de ses dérivés comme suit:

$$\begin{cases} x = \varphi(Y, \dot{Y}, \dots, Y^{(r)}) \\ u = \psi(Y, \dot{Y}, \dots, Y^{(r+1)}) \end{cases} \quad (4.36)$$

Où  $(r)$  est le nombre prédéterminé des dérivés.

Il n'y a aucune équation différentielle de la forme:

$$\zeta(Y, \dot{Y}, \dots, Y^{(k)}) = 0 \quad (4.37)$$

Où  $(k)$  est un nombre prédéterminé des dérivés.

Le vecteur des sorties plates  $Y$  et ses dérivées proposent une représentation de la dynamique du système, de sorte que, si les profils des sorties plates sont prouvées comme une fonction du temps, alors nous pouvons obtenir les profils de tous les états de système et les entrées correspondantes. Cette propriété est utilisée pour estimer les trajectoires de sorties plates[7].

#### 4.4.2 Régulation de l'énergie du système hybride et planification de la trajectoire de référence

L'un des principaux avantages de la commande en utilisant la théorie de platitude, est la possibilité de planifier toutes les trajectoires de la sortie plate, ainsi, si le système est modélisé sans aucune erreur, la représentation de ses trajectoires, donne la possibilité de connaître la variation des variables d'état et les variables de contrôle de ce système à tous moments, sans toutefois n'intégrer aucune équation différentielle [96, 97].

Pour le système hybride renouvelable proposé (PV-WT-FC-Batt-SC), il est supposé que les courants des PV, WT, FC, batterie et les supercondensateurs suivent leurs signaux de référence impeccablement. Par conséquent, le courant de référence peut être donné par les équations (4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42).

$$I_{PV} = I_{PVref} = \frac{P_{PV}}{V_{PV}} = \frac{P_{PVref}}{V_{PV}} \quad (4.38)$$

$$I_{FC} = I_{FCref} = \frac{P_{FC}}{V_{FC}} = \frac{P_{FCref}}{V_{FC}} \quad (4.39)$$

$$I_{WT} = I_{WTref} = \frac{P_{WT}}{V_{WT}} = \frac{P_{WTref}}{V_{WT}} \quad (4.40)$$

$$I_{Batt} = I_{Battref} = \frac{P_{Batt}}{V_{Batt}} = \frac{P_{Battref}}{V_{Batt}} \quad (4.41)$$

$$I_{SC} = I_{SCref} = \frac{P_{SC}}{V_{SC}} = \frac{P_{SCref}}{V_{SC}} \quad (4.42)$$

Où  $P_{pv}$ ,  $P_{wt}$ ,  $P_{fc}$ ,  $P_{Batt}$  et  $P_{sc}$  sont les puissances générées par le système hybride PV-WT-FC-batterie-supercondensateur.  $r_{pv}$ ,  $r_{wt}$ ,  $r_{fc}$ ,  $r_{Batt}$  et  $r_{sc}$  représentent les seules pertes statiques dans les convertisseurs PV, WT, et les FC ainsi que les batteries et les supercondensateurs respectivement.

$V_{pv}$ ,  $V_{wt}$ ,  $V_{fc}$ ,  $V_{Batt}$  et  $V_{sc}$ , le  $I_{pv}$ ,  $I_{wt}$ ,  $I_{fc}$ ,  $I_{Batt}$  et  $I_{sc}$  sont les tensions et les courants de la source photovoltaïque, éolienne, pile à combustible, les batteries de stockage et le supercondensateur respectivement.

L'énergie  $Y_{bus}$  stockée dans le bus continu peut être donnée comme suit:

$$Y_{bus} = \frac{1}{2} C_{bus} V_{bus}^2 \quad (4.43)$$

En outre l'énergie stockée dans les supercondensateurs peut être donnée par l'équation suivante:

$$Y_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 \quad (4.44)$$

Par conséquent, l'énergie totale  $Y_{\text{tot}}$  électrostatique emmagasinée dans le condensateur de bus continue  $C_{\text{bus}}$  et dans le supercondensateur  $C_{\text{sc}}$  peut être écrite comme:

$$Y_{\text{tot}} = Y_T = \frac{1}{2} C_{\text{bus}} V_{\text{bus}}^2 + \frac{1}{2} C_{\text{sc}} V_{\text{sc}}^2 \quad (4.45)$$

Comme le montre la figure 4-1, l'énergie capacitive de bus continue  $Y_{\text{Bus}}$  peut être décrite en utilisant  $P_{\text{pv}_r}$ ,  $P_{\text{wt}_r}$ ,  $P_{\text{fc}_r}$ ,  $P_{\text{Batt}_r}$ ,  $P_{\text{sc}_r}$  et  $P_{\text{ch}}$  par une équation différentielle.

L'énergie  $Y_{\text{bus}}$  selon la  $P_{\text{pv}_r}$ ,  $P_{\text{wt}_r}$ ,  $P_{\text{fc}_r}$ ,  $P_{\text{Batt}_r}$ ,  $P_{\text{sc}_r}$  et  $P_{\text{ch}}$  :

$$\dot{Y}_{\text{bus}} = P_{\text{pv}_r} + P_{\text{WT}_r} + P_{\text{FC}_r} + P_{\text{Batt}_r} + P_{\text{sc}_r} - P_{\text{ch}} \quad (4.46)$$

Tel que:

$$P_{\text{PV}_r} = P_{\text{PV}} - r_{\text{PV}} \times I_{\text{PV}}^2 = P_{\text{PV}} - r_{\text{PV}} \times \left( \frac{P_{\text{PV}}}{V_{\text{PV}}} \right)^2 \quad (4.47)$$

$$P_{\text{WT}_r} = P_{\text{WT}} - r_{\text{WT}} \times I_{\text{WT}}^2 = P_{\text{WT}} - r_{\text{WT}} \times \left( \frac{P_{\text{WT}}}{V_{\text{WT}}} \right)^2 \quad (4.48)$$

$$P_{\text{FC}_r} = P_{\text{FC}} - r_{\text{FC}} \times I_{\text{FC}}^2 = P_{\text{FC}} - r_{\text{FC}} \times \left( \frac{P_{\text{FC}}}{V_{\text{FC}}} \right)^2 \quad (4.49)$$

$$P_{\text{Batt}_r} = P_{\text{Batt}} - r_{\text{Batt}} \times I_{\text{Batt}}^2 = P_{\text{Batt}} - r_{\text{Batt}} \times \left( \frac{P_{\text{Batt}}}{V_{\text{Batt}}} \right)^2 \quad (4.50)$$

$$P_{\text{sc}_r} = P_{\text{sc}} - r_{\text{sc}} \times I_{\text{sc}}^2 = P_{\text{sc}} - r_{\text{sc}} \times \left( \frac{P_{\text{sc}}}{V_{\text{sc}}} \right)^2 \quad (4.51)$$

La puissance demandée par la charge peut être exprimée par l'équation suivante:

$$P_{\text{ch}} = V_{\text{bus}} \cdot I_{\text{ch}} = \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}} \quad (4.52)$$

De plus, la puissance délivrée à partir des supercondensateurs peut être donnée par l'équation (4.53).

$$P_{\text{sc}} = \sqrt{\frac{2Y_{\text{sc}}}{C_{\text{sc}}}} \cdot I_{\text{sc}} \quad (4.53)$$

#### 4.4.3 Démonstration de la platitude du système hybride proposée

Les sorties plat "Y", les variables d'entrée de commande "u" et les variables d'état "x" peuvent être données par les formules (4.54, 4.55, 4.56).

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{\text{bus}} \\ Y_{\text{tot}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

$$u = \begin{bmatrix} P_{\text{sc}} \\ P_{\text{totdemd}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

$$x = \begin{bmatrix} V_{\text{bus}} \\ V_{\text{sc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Dans cette étude, la source photovoltaïque et l'éolienne sont considérées comme étant la source d'alimentation principale pour le système hybride proposé, où  $P_{\text{totdemd}}$  est la puissance totale demandée par l'algorithme de contrôle par platitude.

Nous adoptons que l'énergie électrostatique du bus continu  $Y_{\text{bus}}$  du système est constante et est déterminée comme sortie plat  $Y_1$ . Nous pouvons donc écrire:

$$\dot{Y}_{\text{bus}} = 0 = P_{\text{PV}_r} + P_{\text{WT}_r} + P_{\text{FC}_r} + P_{\text{Batt}_r} + P_{\text{sc}_r} - P_{\text{ch}} \quad (4.57)$$

D'un autre côté, le  $Y_{\text{tot}}$  qui est l'énergie électrostatique totale stockée dans le condensateur du bus continu  $C_{\text{bus}}$  et dans les supercondensateurs, est constante et est déterminée comme une sortie plate  $Y_2$ .

Nous pouvons écrire:

$$\dot{Y}_2 = 0 = P_{\text{PV}_r} + P_{\text{WT}_r} + P_{\text{FC}_r} + P_{\text{Batt}_r} - P_{\text{ch}} \quad (4.58)$$

La première variable d'état (tension du bus continu)  $V_{\text{bus}} = x_1$  et la puissance du supercondensateur (définie comme une variable de commande  $u_1$ ) peuvent être données par les équations algébriques suivantes:

$$x_1 = V_{\text{bus}} = \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} = \varphi(Y_1) \quad (4.59)$$

Le calcul des variables de contrôle peut être réalisé en fonctions des « mécanismes Y » de sortie du système et leurs dérivés. En ce qui suit les formules de calcul (4.62 jusqu'au 4.73):

$$\dot{Y}_{bus} = P_{pv\_r} + P_{WT\_r} + P_{FC\_r} + P_{Batt\_r} + P_{sc} - r_{sc} \times \left( \frac{P_{sc}}{V_{sc}} \right)^2 - \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}} \cdot I_{ch} \quad (4.60)$$

$$P_{sc} = \dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + r_{sc} \times \left( \frac{P_{sc}}{V_{sc}} \right)^2 + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}} \cdot I_{ch} \quad (4.61)$$

On veut que:

$$u_1 = P_{scref} = P_{sc} \quad (4.62)$$

Par conséquent:

$$u_1 = \dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + r_{sc} \times \left( \frac{u_1}{V_{sc}} \right)^2 + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}} \cdot I_{ch} \quad (4.63)$$

$$u_1 - r_{sc} \times \left( \frac{u_1}{V_{sc}} \right)^2 = \dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}} \cdot I_{ch} \quad (4.64)$$

$$u_1 - \frac{u_1^2}{4V_{sc}^2} = \dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}} \cdot I_{ch} \quad (4.65)$$

Avec:

$$P_{scmax} = \frac{V_{sc}^2}{4 \cdot r_{sc}} \quad (4.66)$$

$$u_1 - \frac{u_1^2}{4 \cdot P_{scmax}} = \dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}} \cdot I_{ch} \quad (4.67)$$

$$\frac{u_1}{P_{scmax}} - \frac{u_1^2}{4 \cdot P_{scmax}^2} = \frac{\dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}} \cdot I_{ch}}{P_{scmax}} \quad (4.68)$$

$$-\frac{u_1}{P_{sc\max}} + \left(\frac{u_1}{4.P_{sc\max}}\right)^2 = -\left(\frac{\dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}}.I_{ch}}}{P_{sc\max}}\right) \quad (4.69)$$

$$-\frac{u_1}{P_{sc\max}} + \left(\frac{u_1}{4.P_{sc\max}}\right)^2 + 1 - 1 = -\left(\frac{\dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}}.I_{ch}}}{P_{sc\max}}\right) \quad (4.70)$$

$$\left(1 - \frac{u_1}{2.P_{sc\max}}\right)^2 - 1 = -\left(\frac{\dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}}.I_{ch}}}{P_{sc\max}}\right) \quad (4.71)$$

$$1 - \frac{u_1}{2.P_{sc\max}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}}.I_{ch}}}{P_{sc\max}}\right)} \quad (4.72)$$

$$u_1 = 2.P_{sc\max} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\dot{Y}_{bus} - P_{pv\_r} - P_{WT\_r} - P_{FC\_r} - P_{Batt\_r} + \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}}.I_{ch}}}{P_{sc\max}}\right)}\right) \quad (4.73)$$

D'après l'équation (4.73), le signal de commande  $u_1$  est écrit en fonction de la première sortie plate et sa dérivée.

$$u_1 = \psi(Y_1, \dot{Y}_1) = P_{sc\text{ref}} \quad (4.74)$$

D'où  $P_{sc\text{lim}}$  peut être définie par:

$$P_{sc\text{Lim}} = \frac{V_{sc}^2}{4r_{sc}} \quad (4.75)$$

$P_{sc\text{Lim}}$  est la puissance maximale limitée du convertisseur Buck-Boost, associé au supercondensateur.

La tension du supercondensateur  $V_{sc}$  (la deuxième variable état  $x_2$ ) et la puissance produite par l'éolienne demandée (définie comme le deuxième signal de commande  $u_2$ ) peuvent être écrites par les fonctions algébriques (4.76 et 4.77).

$$x_2 = V_{sc} = \sqrt{\frac{2(Y_{tot} - Y_{bus})}{C_{sc}}} = \varphi_2(Y_1, Y_2) \quad (4.76)$$

La deuxième variable de commande est donnée par l'équation (37):

$$u_2 = 2P_{totLim} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\dot{Y}_2 + i_{load} \cdot \varphi_1(Y_1)}{P_{totLim}} \right)} \right] = P_{totref} = P_{totdemd} \quad (4.77)$$

$$\text{Où: } P_{totLim} = P_{PVLim} + P_{FCLim} + P_{WTLim} + P_{BattLim} \quad (4.78)$$

Par conséquent et d'après les équations de variables de contrôle (4.73 et 4.77), ainsi que les équations de définition des systèmes plats présenté par l'équation (4.34→4.37), le système hybride peut être considéré comme un système plat.

#### 4.4.4 Loi de contrôle asymptotique et planification de la trajectoire de référence

Pour faire suivre la sortie plate  $Y$  à sa référence  $Y_{ref}$ , nous utilisons la loi de commande asymptotique suivante [22, 98]:

$$(\dot{Y}_{ref} - \dot{Y}_1) + k_1(Y_{ref} - Y_1) + k_2 \int (Y_{ref} - Y_1) = 0 \quad (4.79)$$

$$\dot{Y}_1 = \dot{Y}_{ref} + k_1(Y_{ref} - Y_1) + k_2 \int (Y_{ref} - Y_1) \quad (4.80)$$

Pour traquer la deuxième sortie plate du système hybride, on utilise aussi la loi de contrôle suivante:

$$\dot{Y}_2 = \dot{Y}_{2ref} + K_{21}(Y_{2ref} - Y_2) \quad (4.81)$$

En résolvant l'équation quadratique qui caractérise le comportement de la loi de contrôle, (4.79) pour déterminer les coefficients de régulation  $k_{11}$  et  $k_{12}$ , en engageant ses racines:

$$p^2 + k_{11}p + k_{12} = 0 \quad (4.82)$$

D'où la loi de contrôle de l'énergie du bus continu

$$k_{1,21} = 2\zeta w_n \text{ et } K_2 = w_n^2.$$

$\zeta$  et  $w_n$  symbolisent l'amortissement et la pulsation naturels désirés respectivement.

Les coefficients  $k_{11}$ ,  $k_{12}$  sont positifs; ceci indique que les racines du système déterminé possèdent des parties réelles négatives, donc la stabilité de la commande de système est assurée.

Les signaux de commande ( $u_1, u_2$ ) ont été utilisés pour poursuivre la trajectoire désirée du système hybride proposé et faire en sorte que le système traque bien la trajectoire de référence.

## 4.5 Algorithme de l'énergie à travers la conception structurelle du système hybride

### 4.5.1 Algorithme de commande par énergie

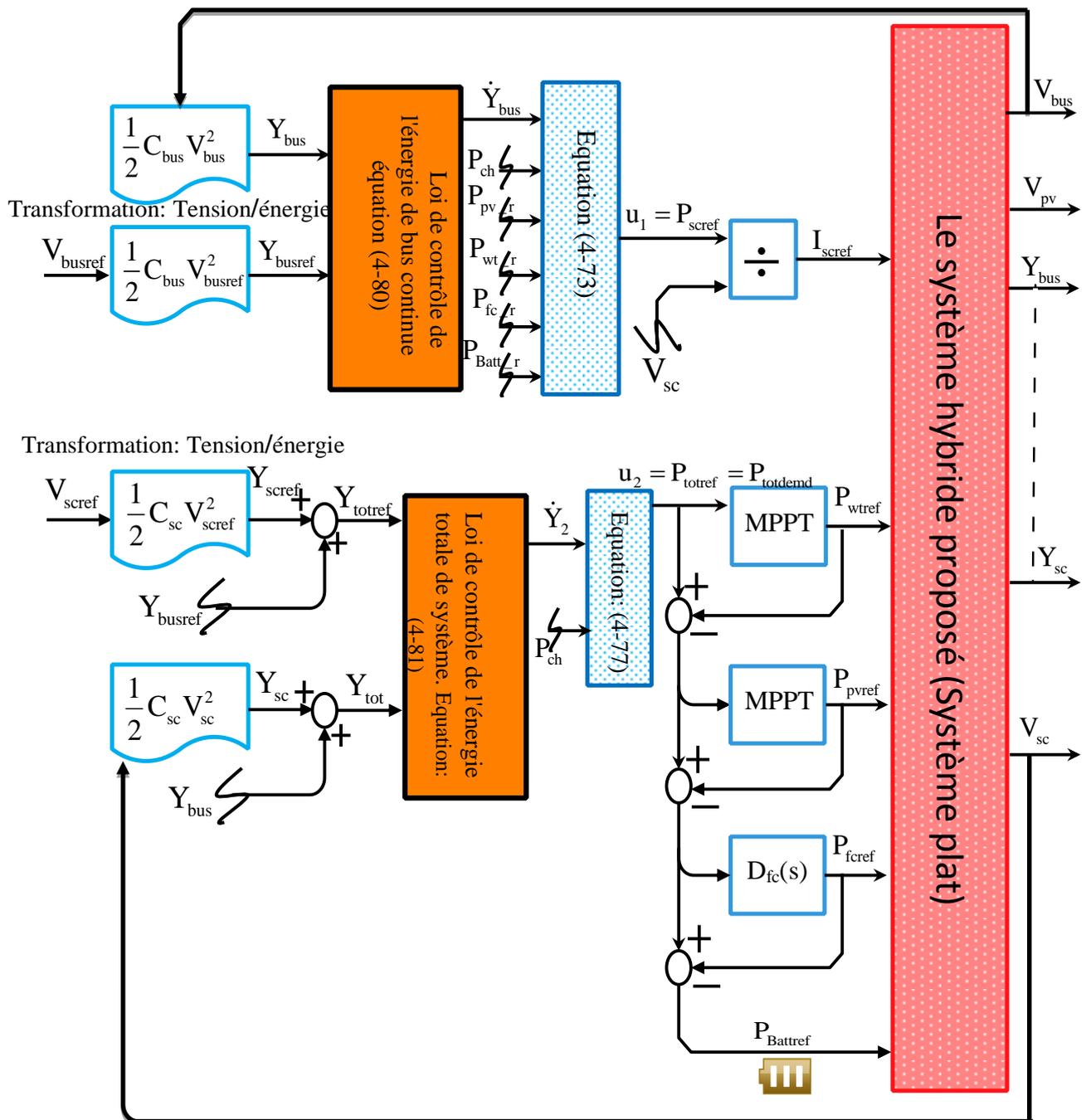


Figure 4-4 Schéma de commande de système hybride.

La figure 4-4 montre le plan de contrôle suggéré du système hybride renouvelable PV-WT-FC-batterie-supercondensateur. Comme détaillé ci-dessus, la loi de contrôle de l'énergie du bus continu crée un signal de référence pour le supercondensateur  $P_{sc\text{ref}}$  par l'équation (4.73); ce signal est ensuite divisé par la tension du supercondensateur  $V_{sc}$  mesurée et limitée en conservant cette tension dans son intervalle de contrainte  $[V_{SC\text{Min}}, V_{SC\text{Max}}]$ , les raisons de la limitation du courant de charge ou du courant de décharge, sont dues à la sensibilité du dispositif de stockage par supercondensateur, cela afin d'augmenter sa durée de vie et garder sa forte dynamique ; les raisons de limitation sont discutées dans [99], il en résulte un courant de référence  $i_{sc\text{ref}}$ . La loi de commande de l'énergie totale génère une référence de puissance totale  $P_{\text{totREF}}$  (selon (4.77) et (4.81)). Le terme  $P_{w\text{tref}}$  est considéré comme signal de référence pour la commande du convertisseur Boost associé à l'éolienne, ceci après avoir été limité dans un intervalle où le maximum est défini par la MPPT et le minimum fixé à 0 W. Ensuite, l'algorithme attribue la différence entre la puissance totale de référence du système de génération  $P_{\text{totref}}$  et la puissance  $P_{w\text{tref}}$  de l'éolienne, afin d'engendrer un autre signal de référence qui à son tour va contrôler la production de puissance de la source photovoltaïque  $P_{p\text{vref}}$ . Il en est de même pour le signal de référence  $p_{f\text{cref}}$ .

Par ailleurs, vu que la dynamique de la pile à combustible est lente, sa puissance doit être diminuée (pour raisons de protection) à un niveau de limitation de dynamique par un filtre de deuxième ordre ( $D_{fc}(s)$ ). Finalement, le contrôle du système de backup (les batteries de stockage secondaire) se fait à travers un calcul entre la puissance totale générée par les sources (WT-PV-FC) et la puissance totale demandée par l'algorithme de commande  $P_{\text{totdend}}$ .

#### 4.5.2 Conception structurelle du système hybride

Le modèle hybride du système de production de puissance WT-PV-FC-Batt-SC comprend des panneaux photovoltaïques, éolienne, piles à combustible, des batteries, supercondensateurs, des onduleurs, régulateurs, ainsi que d'autres appareils et câbles.

Un diagramme de représentation du système hybride proposé est représenté sur la Fig. 4.1. La source éolienne, photovoltaïque et la pile à combustible fournissent la puissance nécessaire pour atteindre la demande de charge ; une fois cette puissance est atteinte, puis dépassée, le superflu de celle-ci sera orienté pour alimenter les supercondensateurs et les batteries jusqu'à ce qu'ils soient complètement chargés. En contrepartie, si l'énergie produite est inférieure à la demande de charge, les batteries aideront à fournir le manque de puissance jusqu'à leurs

épuisements. Les supercondensateurs interviennent seulement lors des pics de puissance de la charge.

Pour une protection et une dynamique élevées, les convertisseurs des sources sont principalement contrôlés par les boucles de courant de référence générées par la commande plate. Ces boucles, peuvent être facilement réalisées via un régulateur PI ou un régulateur qui se base sur le mode glissant. Pour garantir la stabilité du système, la dynamique des boucles de courant intérieures de régulation sont également censés être beaucoup plus rapide que celle des boucles de commande externe.

## 4.6 Dimensionnement du bus continu et convertisseurs associés aux sources

### 4.6.1 Convertisseurs Boost

Le rapport de conversion:

$$V_o = \langle V_o(t) \rangle = \frac{V_{in}}{1-\alpha} \quad (4.83)$$

Le rapport cyclique " $\alpha$ " est toléré entre 0 et 1 donc la tension de sortie " $V_o$ " est inéluctablement supérieure à la tension d'entrée " $V_{in}$ " (montage survolteur figure 4-2).

Si on estime que le courant d'entrée est parfaitement continu, on peut écrire que :

$$I_o = \langle i_o(t) \rangle = \frac{1}{T_d} \int_{\alpha T_d}^{T_d} I_E dt \quad (4.84)$$

$$\text{Donc: } I_o = I_{in}(1-\alpha) \quad (4.85)$$

#### 4.6.1.1 Ondulation du courant $\Delta I_L$

L'ondulation absolue du courant  $i_L$  est déterminée par  $\Delta I_L = I_{LMAX} - I_{LMIN}$ .

Où,  $I_{LMAX}$  et  $I_{LMIN}$  sont la valeur maximale et minimale du courant d'inductance.

L'expression de  $\Delta I_L$  est donnée comme suit:

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_{in}}{L.f} \quad (4.86)$$

Cette expression nous montre que l'ondulation en courant diminue quand la fréquence de commutation  $f$  ou la valeur de l'inductance " $L$ " augmente.

$$\text{Comme } V_{in} = V_o(1 - \alpha), \text{ on peut écrire : } \Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha)V_o}{L.f} \quad (4.87)$$

En résolvant l'équation  $d\Delta I_L / d\alpha = 0$ , on aperçoit que l'ondulation en courant  $\Delta I_L$  est maximale pour  $\alpha = 0,5$ . Le dimensionnement de l'inductance  $L$ , à partir de la relation (4.87), s'effectue à l'aide l'équation (4.88).

$$L \geq \frac{V_o}{4.f.\Delta I_L} \quad (4.88)$$

#### 4.6.1.2 Ondulation de tension $\Delta V_o$

Pour déterminer l'expression de l'ondulation en tension  $\Delta V_o$ , on fait l'hypothèse que le courant " $I_o$ " est parfaitement constant. On a la relation suivante  $i_c = C \cdot d\Delta V_o/dt$ , pour  $0 < t < \alpha T$  on a  $i_c = -I_o$ . La résolution de cette équation différentielle donne:

$$V_o = -\frac{I_o}{C}t + V_{o\max} \quad (4.89)$$

À  $t = \alpha T_d$ , on a:

$$V_o(\alpha T) = V_{o\min} = -\frac{I_o}{C}\alpha T_d + V_{o\max} \quad (4.90)$$

Par suite, on a:

$$\Delta V_o = V_{o\max} - V_{o\min} = \frac{I_o}{C}\alpha T_d \quad (4.91)$$

Finalement:

$$\Delta V_o = \frac{\alpha V_o}{R.C.f} \quad (4.92)$$

Cette expression nous montre que l'ondulation en tension diminue lorsque la fréquence de commutation  $f$  ou la valeur du condensateur  $C$  augmente.

Le dimensionnement du condensateur  $C$ , à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide de l'équation suivante :

$$C \geq \frac{\alpha_{\max} V_o}{\Delta V_o f.R} \quad (4.93)$$

Le courant moyen traversant la diode  $D$  peut être exprimé comme suit:

$$I_D = \langle I_D \rangle = I_o \quad (4.94)$$

Le courant efficace traversant la diode D par l'équation (4.95).

$$I_{Drms} = \sqrt{\left( \left( \frac{I_o}{1-\alpha} \right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12} \right) \cdot (1-\alpha)} \quad (4.95)$$

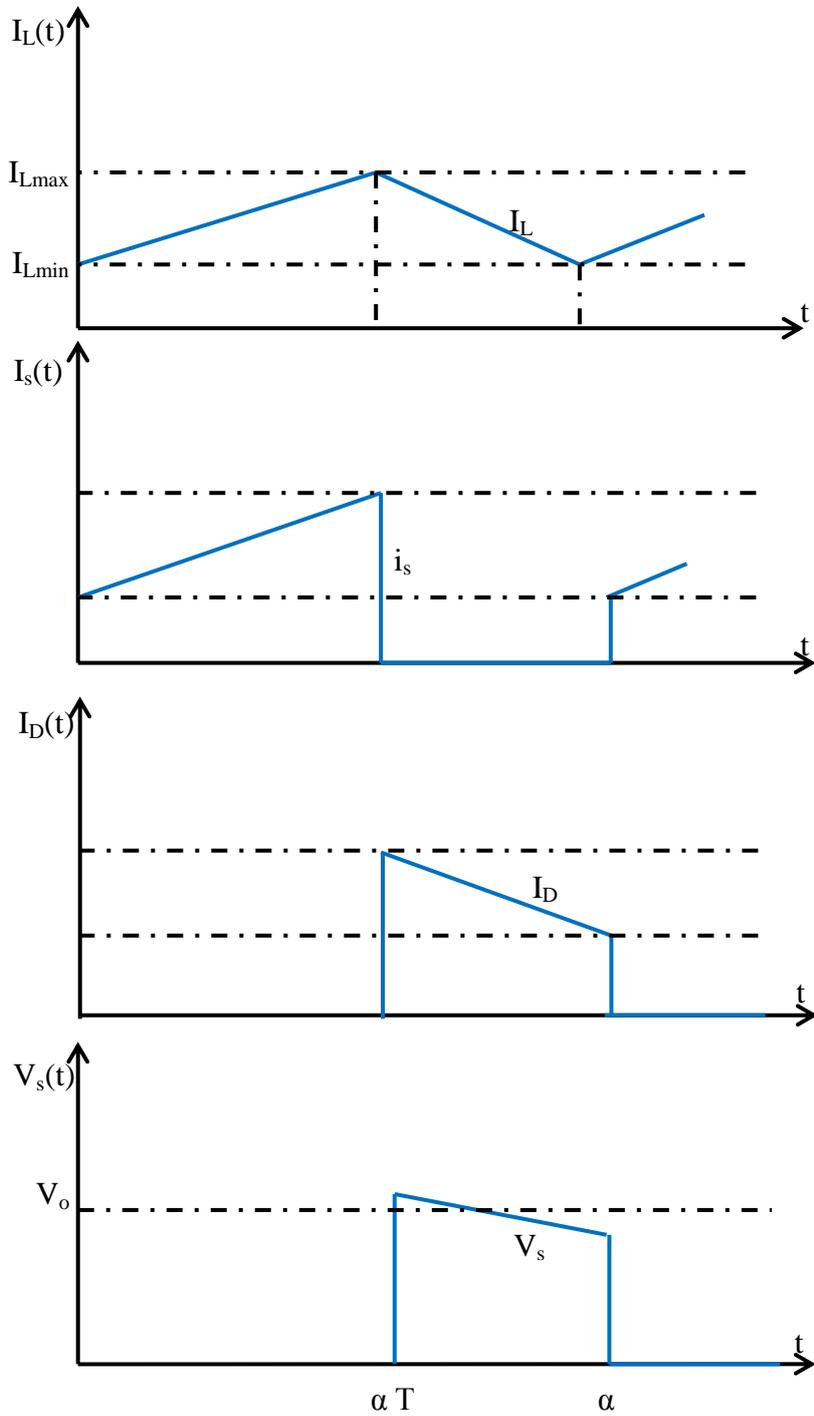


Figure 4-5 Forme d'onde (convertisseur "Boost")

Le courant traversant l'interrupteur S:

$$I_T = \langle I_T \rangle = \frac{I_o}{1-\alpha} = I_{in} \quad (4.96)$$

Le courant efficace traversant l'interrupteur S:

$$I_{Srms} = \sqrt{\left( \left( \frac{I_o}{1-\alpha} \right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12} \right) \cdot \alpha} \quad (4.97)$$

La tension maximale sur l'interrupteur et la diode:

$$V_{SMax} = |V_{Dmax}| = \frac{V_{in}}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (4.98)$$

Contrainte maximale en courant:

$$i_{SMax} = |i_{Dmax}| = \frac{I_o}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (4.99)$$

Les équations précédentes sont utilisées pour choisir les composants du circuit de commutation du convertisseur "Boost". Le côté sécurité d'un composant correspond au domaine courant-tension à l'intérieur duquel le point de fonctionnement doit persister.

#### 4.6.2 Convertisseur Buck-Boost

Le rapport de conversion est donné par l'équation suivante:

$$V_o = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_{in} \quad (4.100)$$

L'ondulation du courant pour le convertisseur Buck-Boost est définie par:

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_{in}}{L.f} \quad (4.101)$$

Pour  $V_{in} \alpha = V_o (1-\alpha)$ , la formule de l'ondulation du courant sera comme suit:

$$\Delta I_L = \frac{(1-\alpha)V_o}{L.f} \quad (4.102)$$

L'expression de l'ondulation de tension est donnée comme suit:

$$\Delta V_o = \frac{\alpha^2 V_{in}}{(1-\alpha)R.C.f} \quad (4.103)$$

##### 4.6.2.1 Les contraintes sur l'interrupteur S et la diode D

La tension maximale supportée par l'interrupteur S et la diode D est donnée par (4.104).

$$V_{S\text{Max}} = |V_{D\text{max}}| = \frac{V_{\text{in}}}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (4.104)$$

Le courant maximal qui peut être supporté par l'interrupteur S et la diode D:

$$i_{S\text{Max}} = |i_{D\text{max}}| = \frac{I_o}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (4.105)$$

Il est à noter que:  $f$  est la fréquence de découpage,  $\alpha$  est le rapport cyclique et  $R$  est la charge équivalente.

$V_{\text{in}}$ ,  $V_o$  respectivement la tension d'alimentation et celle de sortie.

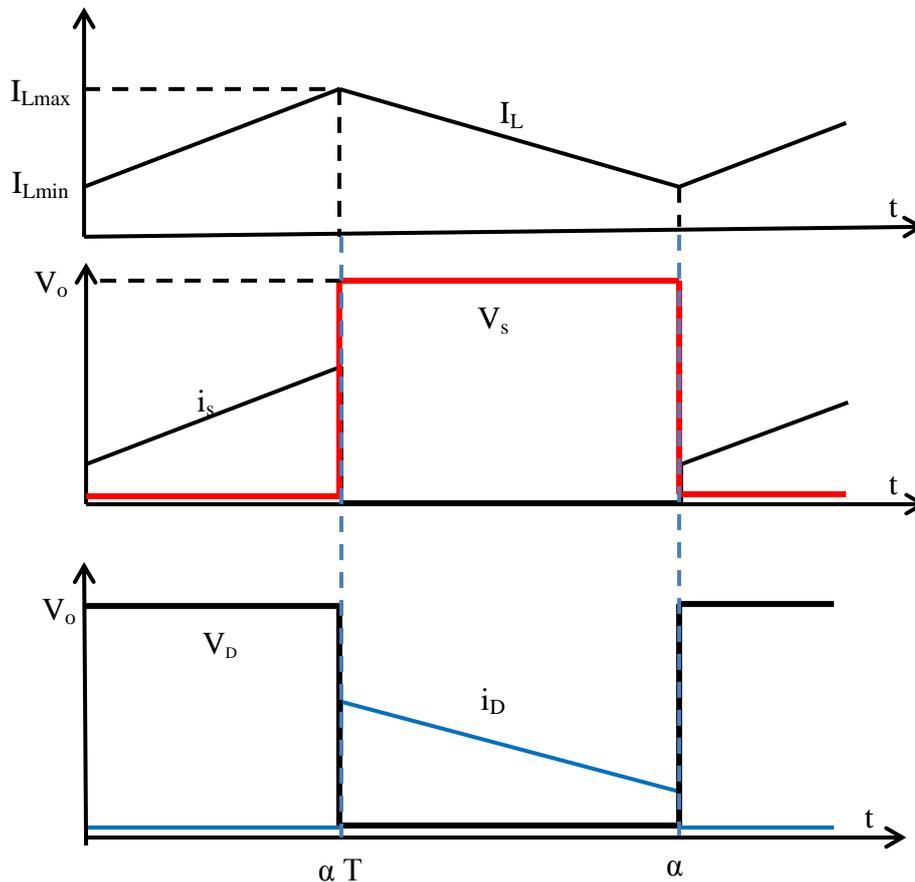


Figure 4-6 Forme d'onde (convertisseur Buck-Boost)

#### 4.7 Régulateurs du courant par mode glissant

Le mode glissant est une façon élémentaire et robuste du réglage des systèmes électrique. Cette technique connaissant des évolutions importantes dans tous les usages de la commande par sa détermination non linéaire qui contrôle la dynamique d'un système non linéaire par application d'un signal de commande discontinue qui oblige le système à "glisser" le long d'une section transversale traduisant le comportement stable et normal du système.

D'autre part, la régulation par mode glissant peut être définie comme un mode de fonctionnement particulier pour les systèmes à structure variable non linéaire. Le principe repose donc sur le choix à priori de cette fonction qui décrit une surface de commutation (sur laquelle et sous certaines conditions), les trajectoires du système sont maintenues dans l'espace de fonctionnement normale et stable du système. Le système est nommé alors en régime glissant sur la surface étudiée. Par conséquent, le système bouclé est insensible à certaines perturbations [100].

Dans cette partie, nous utilisons des régulateurs glissant afin de contrôler le courant inductif de chaque convertisseur qui est donné sur la base du modèle « moyen ». La commande par mode glissant est une méthode de commande bien adaptée aux convertisseurs statiques [101], ainsi que sa stabilité est indépendante des variations autour du point de fonctionnement, ce qui nous permet d'améliorer les performances globale du contrôleur [101].

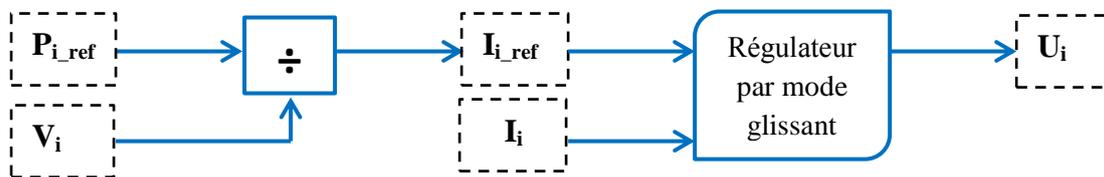


Figure 4-7 Schéma de contrôle par mode glissant

$P_{i\_ref}$  et  $V_i$  sont les puissances de référence de chaque source et ces tensions, dont  $i = [PV, WT, FC, Batt, SC]$ .

$I_{i\_ref}$  et  $I_i$  sont les courants de référence et les courants mesurés de chaque source.

$U_i$  sont les signaux de commande de chaque convertisseurs.

On définit la surface de glissement pour la régulation des convertisseurs Boost et Buck-Boost associé comme suit:

$$S_i = (I_i - I_{i\_ref}) + k_1 \int_0^t (I_i - I_{i\_ref}) dt \quad (4.106)$$

Tel que:  $K_1$  décrit la dynamique approprié pour que l'erreur statique converge vers zéro.

Afin de régler la dynamique de convergence de surface du régulateur glissant, la loi de commande suivante a été définie comme:

$$\dot{S}_i = -\lambda_i S_i \quad (4.107)$$

Où  $\lambda_i$  sont les facteurs de convergence décrit comme des nombres réels positifs.

D'après les équations des courants inductifs déterminés dans (4.28→4.32) et d'après la formule définissant la surface de glissement (4.106), les signaux de commande par mode glissant peuvent être écrits comme suit:

$$L_i \dot{I}_i = V_i - (1 - U_i) V_{bus} - r_i I_i \quad (4.108)$$

Et on peut écrire aussi que:

$$U_i = 1 - \frac{V_i - r_i I_i - L_i \dot{I}_i}{V_{bus}} \quad (4.109)$$

On introduit (4.106) dans (4.107):

$$\dot{S}_i = -\lambda_i \left[ (I_i - I_{iref}) + k_i \int_0^t (I_i - I_{iref}) dt \right] \quad (4.110)$$

Ensuite, d'après (4.106):

$$\dot{S}_i = (\dot{I}_i - \dot{I}_{iref}) + k_i (I_i - I_{iref}) \quad (4.111)$$

Donc:

$$I_i = -\lambda_i S_i - (I_{iref}) + k_i (I_i - I_{iref}) \quad (4.112)$$

On introduit l'équation (1.112) dans (4.109), le signal de commande des convertisseurs:

$$U_i = 1 - \frac{V_i - r_i I_i - L_i (-\lambda_i S_i - \dot{I}_{iref} + k_i (I_i - I_{iref}))}{V_{bus}} \quad (4.113)$$

La formule (4.113) décrit le signal de commande des convertisseurs qui est indépendant de la valeur de la charge. De ce fait, ce régulateur ne sera pas perturbé par les variations de cette charge [101].

En remplaçant (4.113) dans (4.28→4.32), pour avoir l'équation décrivant la dynamique de l'erreur des courants :

$$(\dot{I}_i - \dot{I}_{iref}) + (\lambda_i + k_i) \cdot (I_i - I_{iref}) + \lambda_i \cdot k_i \cdot \int (I_i - I_{iref}) \cdot d\tau = 0 \quad (4.114)$$

Après dérivation de l'équation (4.114), le système devient comme suit:

$$\ddot{z}_i + (\lambda_i + k_i) \cdot \dot{z}_i + \lambda_i \cdot k_i \cdot z_i = 0 \quad (4.115)$$

$$\text{Tel que: } z_i = I_i - I_{\text{iref}} \quad (4.116)$$

Les facteurs  $K_i$  et  $\lambda_i$  peuvent être déterminés par la résolution de l'équation différentielle du deuxième ordre (4.115) en utilisant les lieux des racines afin d'avoir la convergence appropriée à la conception du système ainsi que la bonne performance désirée du régulateur basé sur le mode glissant.

D'autre part, la stabilité de notre régulateur est vérifiée par la partie réelle négative des racines de l'équation caractéristique (4.115), dont tous les coefficients sont positifs.

#### 4.8 Résultats de simulation

L'ensemble des sources et des convertisseurs associés, ainsi que la commande utilisée avaient été simulée sous l'environnement de Matlab-Simulink. Un modèle réduit en puissance a été utilisé pour faire simuler le fonctionnement, le comportement et la façon d'agir de la commande appliquée sur des différents scénarios proposés.

Les différentes sources d'énergie de notre système hybride sont illustrées sur les tableaux suivants:

Tableau 4.1 Paramètre de la source photovoltaïque

Source photovoltaïque	$V_{oc}(V)$	$I_{cc}(A)$	$I_{op}(A)$	$V_{op}(V)$	$R_p(\Omega)$	$P_c(W)$
	$43.2 \times N_s$	$5.1 \times N_p$	$4.8 \times N_p$	$34.4 \times N_s$	$0.45 * (N_s / N_p)$	$165 \times N_p$

Tel que;  $V_{oc}$  est la tension du panneau en circuit ouvert, le  $I_{cc}$  est le courant de court-circuit,  $I_{op}$  est le courant de panneau correspondant au point de puissance optimal,  $V_{op}$  est la tension de panneau correspondante au point de puissance optimal aussi,  $R_p$  la résistance-shunt,  $N_p$  et  $N_s$  sont le nombre des panneaux en parallèle et en série respectivement ( $N_p=4$ ,  $N_s=1$ );  $P_c$  est la puissance crête de la source photovoltaïque.

Tableau 4.2 Paramètre de la source éolienne

Source Eolienne	Vitesse de démarrage du vent	Vitesse nominale du vent	Tension de sortie	Le type de sortie	Puissance nominale générée	Type d'éolienne
	3.5 m/s	12.5 m/s	48V	DC redressé	600(W)	PMSG

Où le PMSG indique une "génératrice synchrone à aimant permanent".

Tableau 4.3 Paramètre de la pile à combustible

La pile à combustible	Type de la pile	Tension nominale	Courant nominale	Puissance nominale générée
	PEM	24V	27A	500(W)

Tableau 4.4 Paramètre de la batterie utilisée

Batteries	Type des batteries	Tension nominale	Capacité	Plage de levée de la tension	Résistance interne
	plomb-acide	24V	100Ah	34.8-22V	0.0012Ω

Tableau 4.5 Paramètre du supercondensateur

Supercondensateur	Capacité de cellule	Tension maximale de la cellule	Nombre des cellules en série	Nombre des cellules en parallèle	Capacité totale	Tension maximale de banc	Modèle de cellule
	1200F	2.7V	18	7	67F	48.3V	BCAP1200 (Maxwell technologies)

Les paramètres des convertisseurs associés aux sources précédentes sont donnés au Tableau 4.6. Notons la présence des hypothèses suivantes:

1. La tension référence du bus continu est prise égale à 120V.
2. La tension de référence des supercondensateurs est considérée égale à 48V.
3. L'erreur statique acceptable au niveau de la tension de sortie doit être dans la marge  $[-1\div 1V]$ .
4. L'énergie électrostatique au niveau du bus continu doit être constante.

Tableau 4.6 Paramètres des convertisseurs

Les sources	Source PV (Boost)	Source WT (Boost)	Source FC (Boost)	Source Batt (Buck- Boost)	Supercondensateurs (Buck-Boost)
1	594W	540W	450W	/	/
2	4.95A	4.5A	4.10A	4.20A	5.31A
3	0.7	0.6	0.8	0.83	0.7
4	13.80A	11.24A	20.5A	13.55A	17.70A
5	16.50A	11.2A	20.4A	10.5A	17.75A
6	114.67V	120.01V	120.01V	113.58V	160.07V
7	16.52A	11.27A	20.52A	16.54A	17.72A
8	2mH	2mH	2mH	2mH	2mH
9	90%	90%	90%	90%	90%
10	1%	1%	1%	1%	1%
11	15%	15%	15%	15%	15%

1: Puissance de sortie, 2: Courant de sortie, 3: Rapport cyclique, 4: Courant efficace de l'interrupteur S, 5: Courant efficace de la diode D, 6: Tension maximale supportée par l'interrupteur "S" et la diode "D", 7: Courant maximal supporté par l'interrupteur S et la diode D, 8: Valeur de l'inductance L, 9: le rendement, 10: l'ondulation de tension, 11: l'ondulation de courant.

La fréquence de découpage égale à 12khz. Le bus continu est régulé sur la tension de 120V avec une marge d'erreur statique moins de 1V.

La capacité du bus continu  $C_{bus}$  est: 3200uF.

Les résultats de simulation obtenus sur Matlab-Simulink sont illustrés sur les figures suivantes:

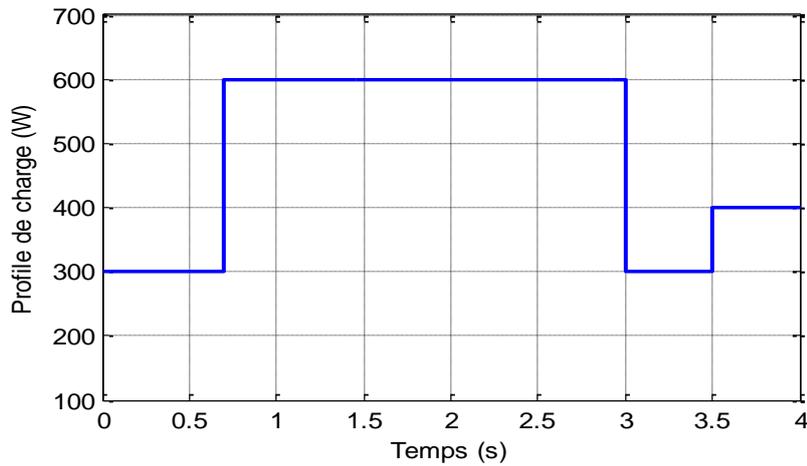


Figure 4-8 Profil de la charge

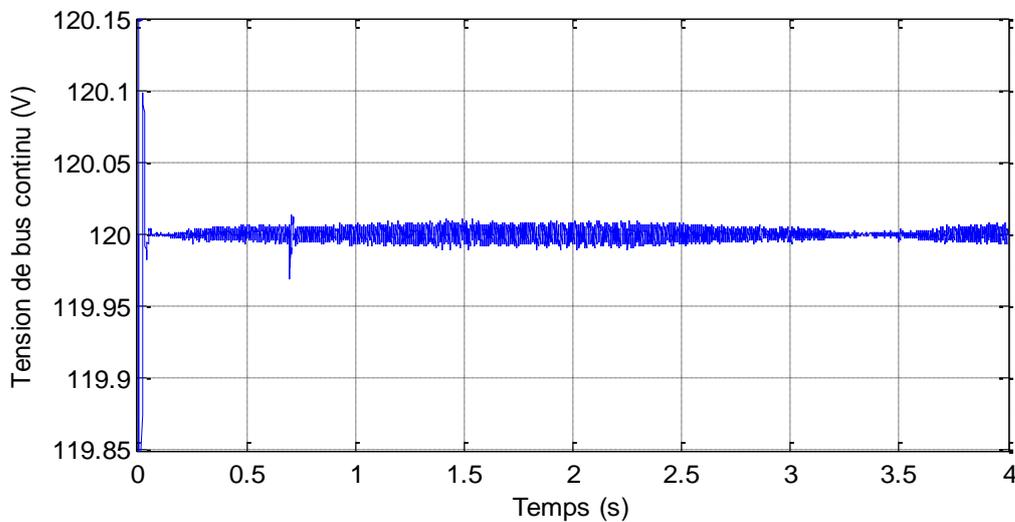


Figure 4-9 Tension de bus continu

La figure 4-8 montre le profil de la charge demandée, où nous distinguons trois cas étudié:

- Une demande de puissance de l'ordre de 300W au démarrage du système hybride par le point  $t=0s$ .
- A  $t=0,7s$ , une augmentation de la puissance demandée vers une valeur de 600W (accroissement avec un pourcentage égale à 100% de la charge demandée).
- A  $t=3s$ , une diminution de la puissance demandée vers une valeur de 300W (décroissement avec un pourcentage égale à 100% de la charge demandée).

- A  $t=3.5s$ , une augmentation de la puissance demandée vers 400W (accroissement avec un pourcentage égale à 30% de la charge demandée).

La figure 4-9 illustre la tension du bus continu régulée à 120V. Nous examinerons le système avec une première variation positive de la charge, à partir de 300 à 600W, et une deuxième variation négative de 600 à 300 W et une troisième variation positive de 300 à 400 W. Cette figure également, montre le bon comportement de la tension de sortie ajusté à la tension désiré (120V) pour une réponse transitoire obtenue, pendant trois changements importants de la charge, avec échelon positif et négatif. Nous analyserons une bonne traque de la référence de tension, par conséquent, la tension de sortie suit la référence de tension avec une erreur statique maximale ne dépassant pas les 0.020% (0.025V).

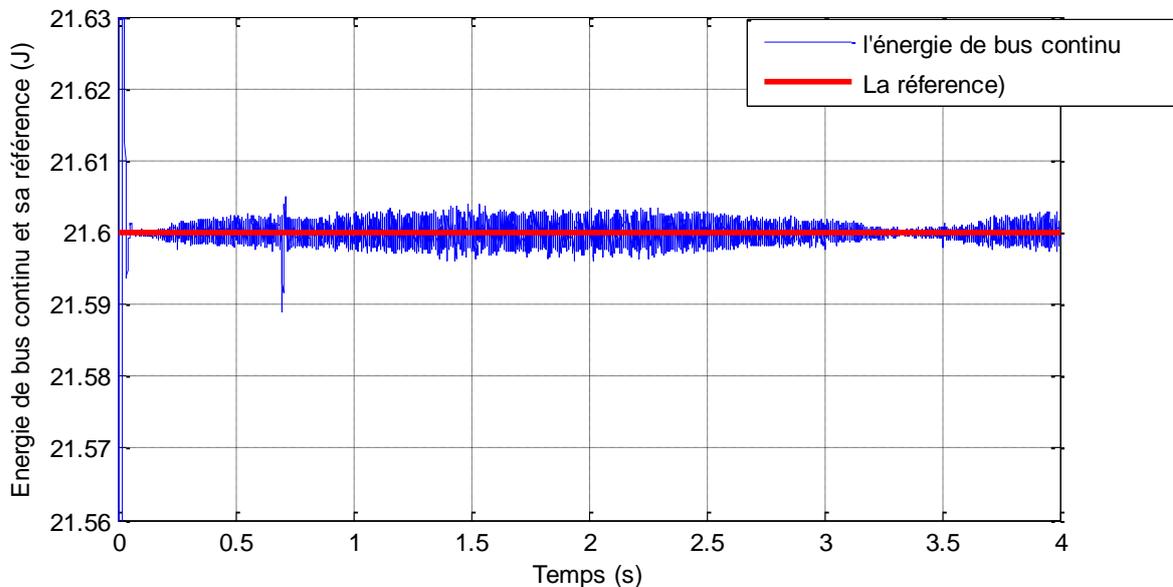


Figure 4-10 Energie de bus continu et sa référence

D'après l'analyse des figures 4-10 et 4-11 on observe que l'énergie du bus continu traque sa référence, on déduit que la commande par platitude donne une bonne performance dynamique lors de la variation de la charge avec une marge d'erreur statique trop étroite pour une tension de sortie. L'analyse de la deuxième figure montre la bonne assignation des signaux de commande engendrés à travers la commande plate et les régulateurs non linéaire du courant par mode glissant pour une variation d'énergie électrostatique presque nulle, par suite, une stabilisation du système et au niveau de la tension de sortie.

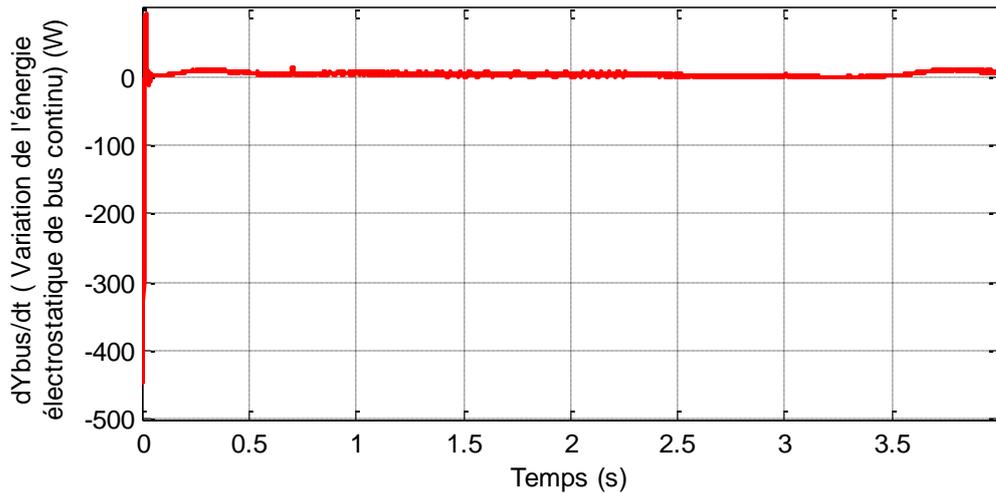


Figure 4-11 Variation de l'énergie électrostatique dans le bus continu

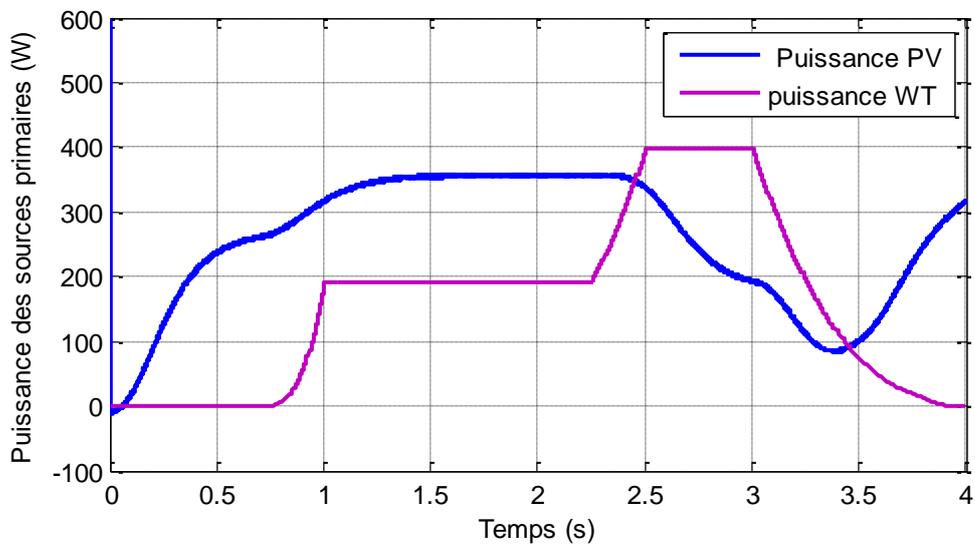


Figure 4-12 Puissance produite par les sources primaires

La figure 4-12 montre la puissance produite par les sources primaires (photovoltaïque et la source éolienne). La puissance générée par la source PV dépend essentiellement du profil de l'éclairement et les signaux de commande du convertisseur Boost associé, en rapport avec l'algorithme MPPT. Où la puissance demandée par la commande plate sera comparée et examinée par rapport à la puissance calculée et demandée par le block MPPT, de sorte que, si la puissance PV référence conçue par la commande plate est supérieur à la puissance référence calculée par le block MPPT, l'algorithme de contrôle choisira alors, la puissance désignée par le block MPPT comme signale de référence. Dans l'autre cas, le convertisseur

Boost sera commandé via la puissance demandée par le signal puissance provenant de la commande plate.

En outre, la puissance générée par l'éolienne dépend également au profil du vent, dont la source WT commence à produire son énergie à partir de l'instant  $t=0.8s$  dès que la vitesse de vent atteint les 12m/s. La source éolienne dans ce travail est considérée relativement libre dépendant des conditions du vent.

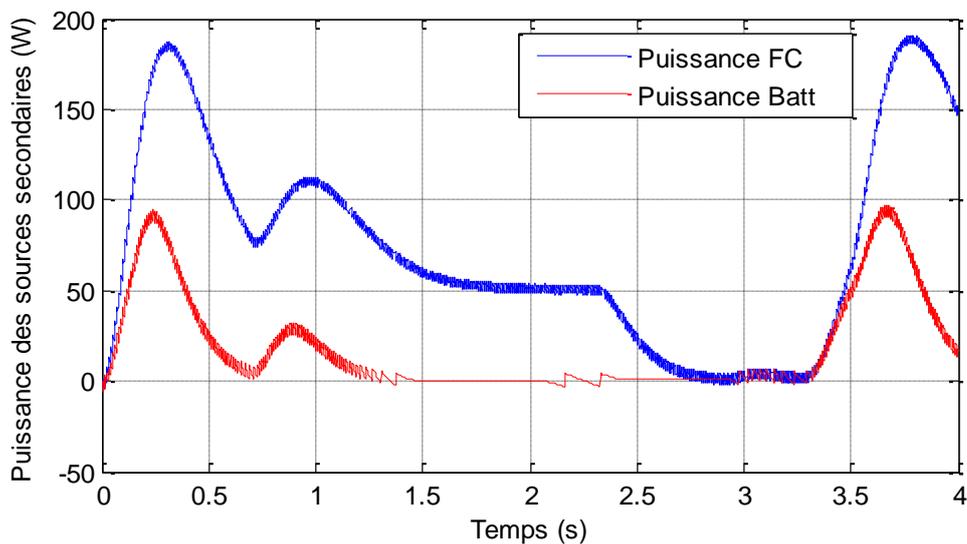


Figure 4-13 Puissance produite par les sources secondaires

La figure 4-13 révèle le comportement des sources secondaires (la pile à combustible & les batteries). La source secondaire FC commence à produire son énergie au démarrage du système avec une dynamique relativement lente dus à la conception de la pile à combustible. En revanche, les batteries aussi commencent à alimenter le système hybride de point zéro, aidant les sources primaires et la source secondaire, jouant le rôle d'un système de backup.

La figure 4-14 dévoile le procédé de reproduction de puissance via le système "supercondensateurs" pendant le temps de simulation et durant les fortes variations de charge discutées précédemment. Dans notre système hybride, les supercondensateurs ont deux rôles principaux, d'une part, ils sont utilisés comme une source de puissance pour des raisons de stockage, d'autre part, ils sont employés pour le réglage et l'ajustement de la tension de sortie au niveau du bus continu.

L'ajustement de la tension par les supercondensateurs se fait par:

- Une alimentation en puissance durant les pics de charge demandée.

- Une absorption de puissance aux instants de superflu engendrée lorsque la puissance fournit est supérieure à celle demandée par la charge.

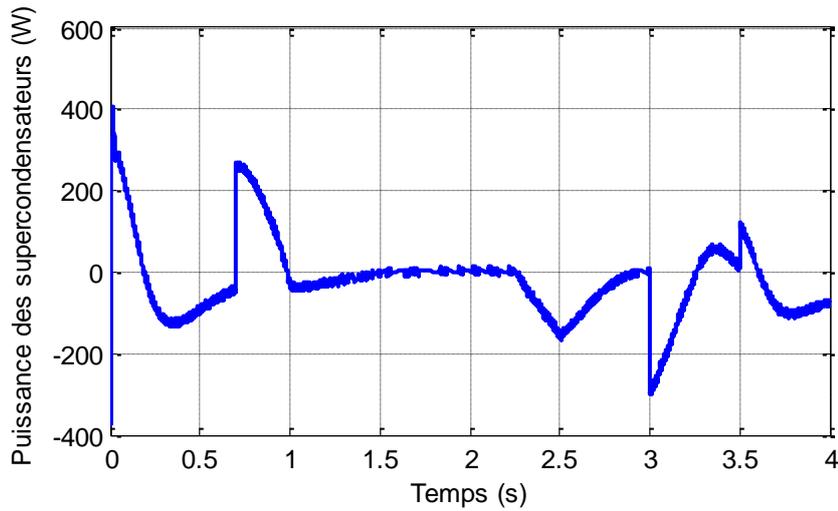


Figure 4-14 Puissance des supercondensateurs

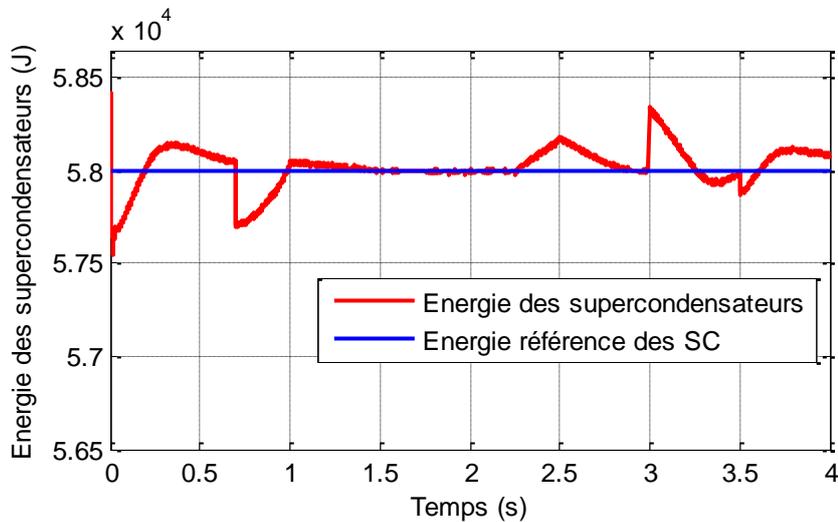


Figure 4-15 Energie fournit par les supercondensateurs

La figure 4-15 dénonce l'énergie produite par les supercondensateurs et sa référence. La référence d'énergie des supercondensateurs est en fonction de ses tensions de référence (dans notre système, la tension référence des supercondensateurs égale à 48V). L'énergie des supercondensateurs balance entre son intervalle désirée pour maintenir la stabilisation du système et sa tension de sortie à 120V.

D'après les figures précédentes des puissances générées par les différentes sources employées, on constate que le système hybride atteint son objectif pour la régulation de

tension de sortie avec une erreur statique très acceptable qui ne franchie pas les contraintes techniques imposées dans le cahier de charge, d'une part, et pour la gestion de l'énergie, d'autre part, dans laquelle on observe que la charge est complètement couverte à tout instant par l'énergie produite.

En plus, ces figures illustrent les modes de fonctionnement de base de la source hybride étudiée WT-PV-FC-Batt-SC. L'état initial du système a une puissance de charge égale à 300W, et le dispositif de stockage de SC est complètement chargé, à savoir,  $V_{SC} = 48V$ ; par conséquent, la puissance des sources primaires, ainsi que les sources secondaires sont égales à zéro, et la puissance du SC est égale à 300W pour couvrir la puissance de charge demandée.

A  $t=0,1s$ , la commande plate dirigeait toutes les sources pour faire alimenter la charge et charger les supercondensateurs qui ont été déchargé lors du démarrage du système. Dont, la source primaire PV continuera à alimenter la charge selon le profil de l'éclairement disponible, pendant que les autres sources tendent vers zéro puis l'extinction. Cependant, l'autre source primaire (WT) ne génère aucune puissance (dûe au profil de vent utilisé).

A  $t = 0,7s$ , la valeur de la charge passe de 300 W à 600W (selon le profil de charge figure 4-8), sachant que la puissance du PV finale n'atteint pas la valeur de charge requise (car une limitation au niveau de 320W est employée simulant un manque d'éclairement solaire; donc, la source WT commence à fournir sa puissance pour compenser la puissance des panneaux solaires et couvrir la demande de charge, quoique l'énergie produite reste toujours inférieure à celle de la charge, donc, la commande plate orientera le système afin d'activer la première source secondaire (FC) qui à son tour va produire le nécessaire de puissance.

A  $t=3s$ , une forte variation de charge avec un échelon négatif à une valeur constante de 300W a été provoquée, le SC, absorbe le superflu de la puissance durant l'instant transitoire. En même temps, on observe une diminution de l'énergie provenant des sources primaires afin d'équilibrer le rapport "demande et production" entre les sources et la charge ; ensuite, a  $t=3.5s$  une autre perturbation de charge se crée(une augmentation de la puissance demandée jusqu'à 400W) les SC fournissent le manque de puissance en régime transitoire, la source primaire PV est orientée pour fournir l'énergie nécessaire de charge, tandis que la puissance de WT diminue vers le zéro (selon le profil de vent insuffisant pour la production d'énergie éolienne), les sources secondaires couvrent le manque de puissance demandée.

La figure 4-16 montre la valeur du courant produit par les supercondensateurs pour chaque instant, et pendant les perturbations de la charge, elle contient aussi le courant de référence traqué. Cette figure montre également le bon comportement des régulateurs en mode glissant, pour chaque instant des régimes transitoires. Les courants fournis via les supercondensateurs suivent parfaitement leurs références, donc les supercondensateurs, engendrent une grande stabilité du niveau de la tension de sortie.

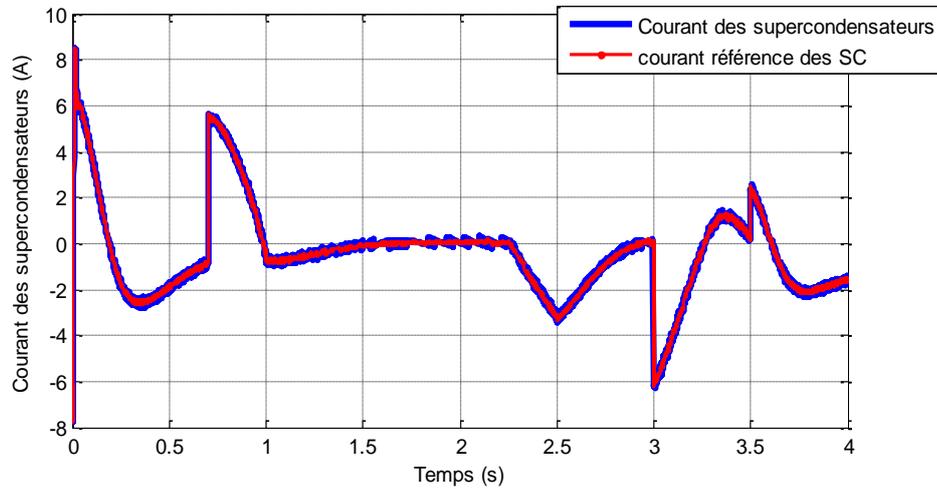


Figure 4-16 Courant des supercondensateurs

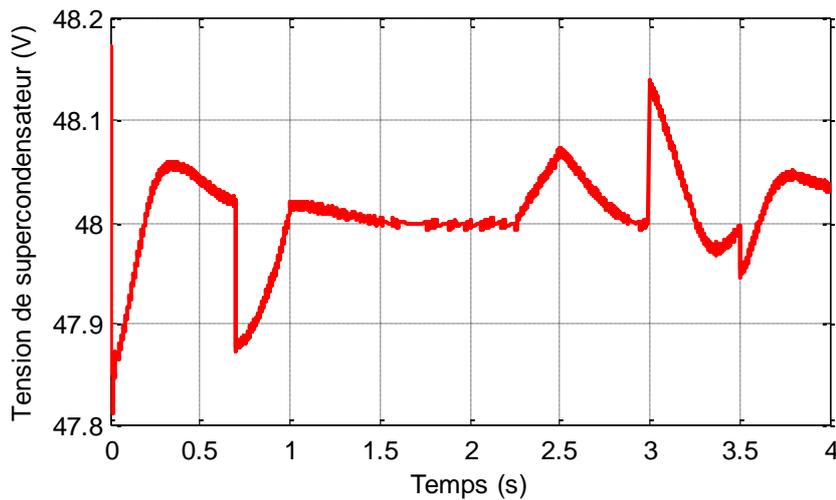


Figure 4-17 Tension des supercondensateurs

La figure 4-17 montre la tension mesurée aux bornes du dispositif de stockage (SC). La tension mesurée prend ses valeurs dans l'intervalle de  $[47.8V \div 48.2V]$ , que nous avons ajusté à 48V ; en revanche, on remarque qu'une diminution importante au niveau de la tension du

dispositif SC était au moment du démarrage du système, provoqué par le fort appel de courant.

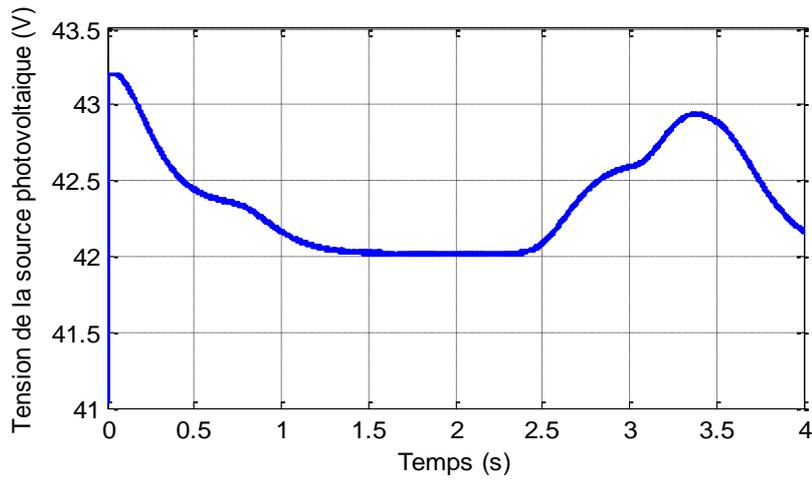


Figure 4-18 Tension de la source photovoltaïque

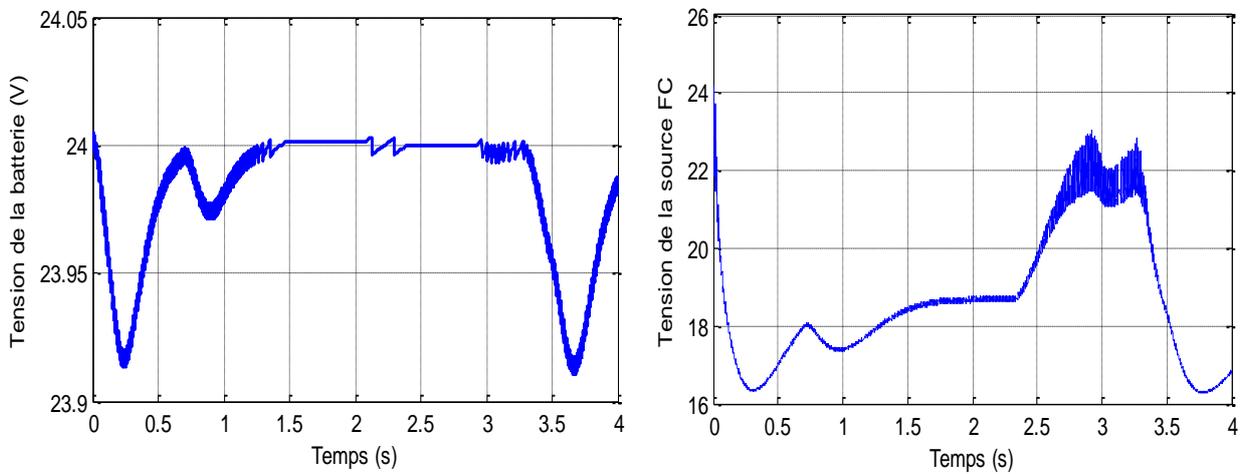


Figure 4-19 Tension de la pile à combustible et la batterie

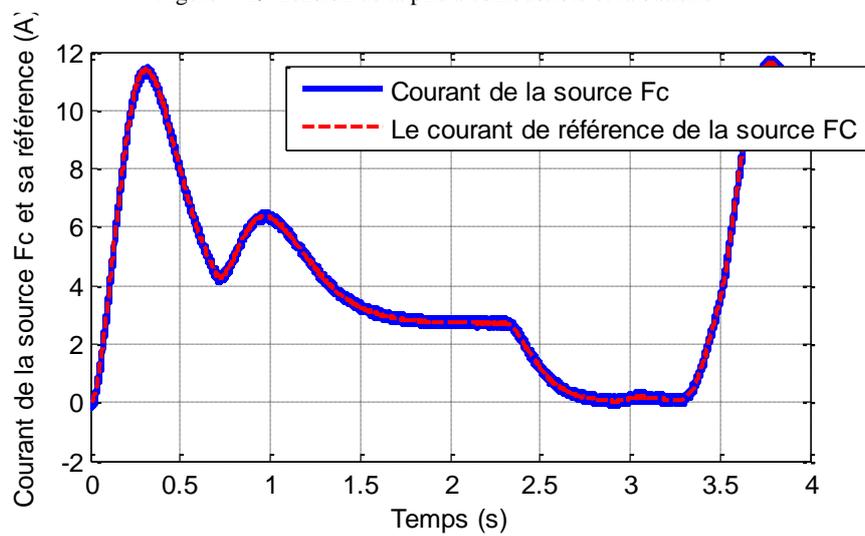


Figure 4-20 Courant de la pile à combustible

La figure 4-19 illustre les tensions de la source PV, FC et la source secondaire batteries. On observe que la tension de la pile à combustible a eu une grande perturbation entre les instants  $[2,5 \div 3,5 \text{ s}]$ , cette perturbation est justifiée d'une part par la mise à zéro de la valeur du courant demandée durant cet intervalle, et d'autre part par la dynamique lente de la source FC. D'après la figure 4-20, on remarque que le courant généré par la pile à combustible traque parfaitement sa référence qui provient du régulateur par mode glissant.

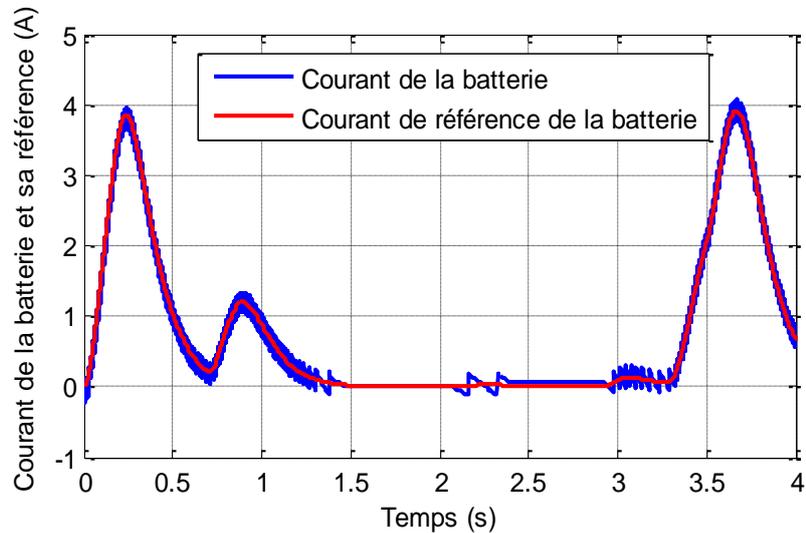


Figure 4-21 Courant de la batterie

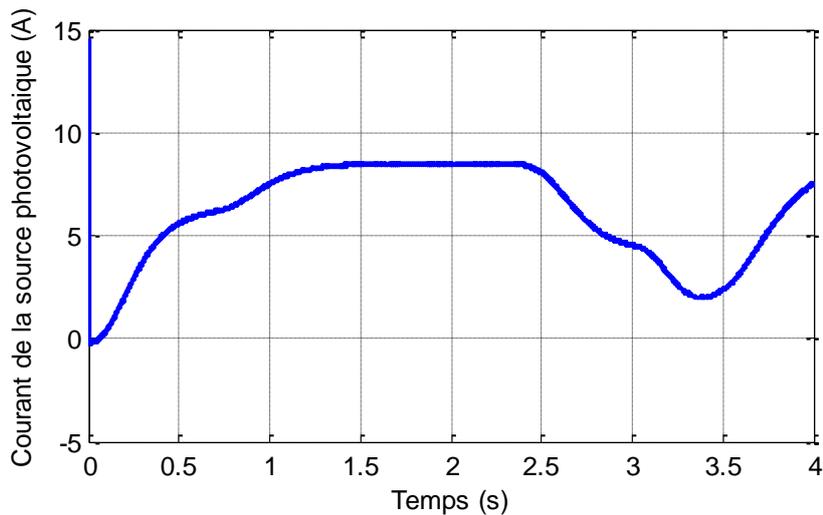


Figure 4-22 Courant de la source PV

La figure 4-21 présente le comportement du courant de la batterie, celui-ci suit bien sa référence. Pour la figure 4-22, on voit la valeur du courant généré pour chaque instant et pendant le fonctionnement de la source PV.

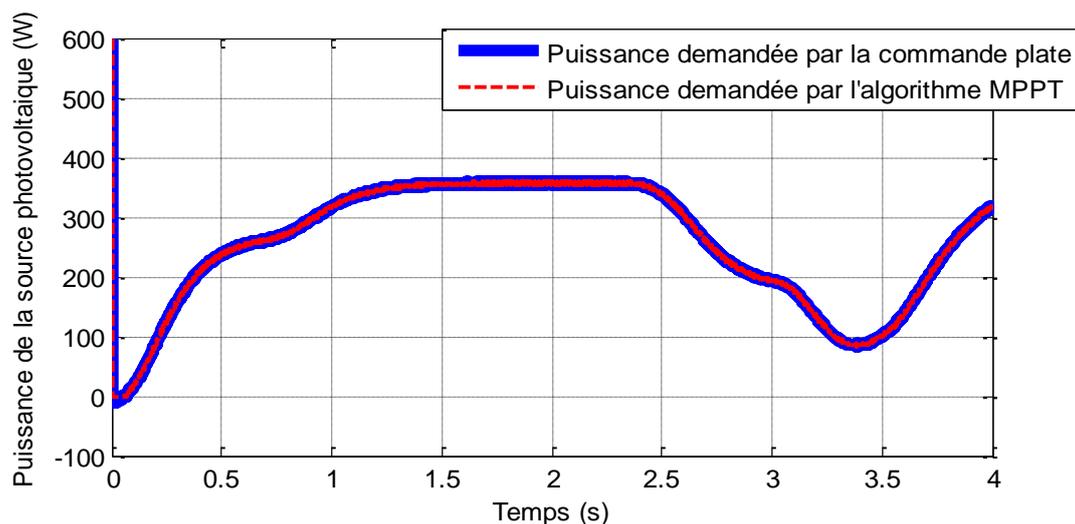


Figure 4-23 Puissance délivrée par la source PV et l'algorithme MPPT

La figure 4-23 montre la puissance délivrée par la source PV, comparée à celle de la puissance demandée par la commande plate et celle demandée par l'algorithme MPPT. On remarque que la puissance générée par la source PV est typiquement la même que celle demandée par l'algorithme MPPT et celle demandée par la commande plate. Sauf qu'il est à noter qu'ils existent des instants déterminés de fonctionnement où l'énergie requise par notre commande plate est supérieure à celle produite par le système PV, ce qui entraîne le lancement des sources secondaires de notre système hybride.

A partir l'analyse des résultats précédents, on constate que le système hybride avec plusieurs sources de production d'énergie et de production de puissance, forme un dispositif efficace pour les différentes valeurs de la charge demandée. La forte dynamique est garantie par l'utilisation de deux sources primaire et deux autres secondaires avec un banc de supercondensateurs, servant à compenser les perturbations de la puissance demandée pendant les régimes transitoires. De plus, l'hybridation des sources PV, WT et leur dépendance des conditions climatiques sont ajustées par l'utilisation de deux types de stockage, à savoir les batteries, et les supercondensateurs.

#### 4.9 Validation expérimentale de la commande utilisée

Nous allons aborder dans cette partie la validation expérimentale de notre commande proposée, en l'appliquant à un système hybride, contenant une source photovoltaïque, un émulateur de la pile à combustible, ainsi que le dispositif de stockage à base de batteries de plomb. Cette validation a été réalisée sur un banc expérimental à puissance réduite selon l'équipement disponible de notre laboratoire.

L'objectif attribué à notre contribution expérimentale est d'examiner puis vérifier le bon fonctionnement de la commande appliquée à notre système hybride proposé sous les contraintes techniques et les objectifs discutés précédemment (la régulation de tension de sortie et la gestion de l'énergie entre les différentes sources). Il est à noter que l'utilisation de l'émulateur, revient au non disponibilité de la pile à combustible au sein du laboratoire.

#### 4.9.1 Description du banc d'essai expérimental

Le banc d'essai expérimental du système hybride proposé au sein du laboratoire MSE est représenté sur la figure 4-24.

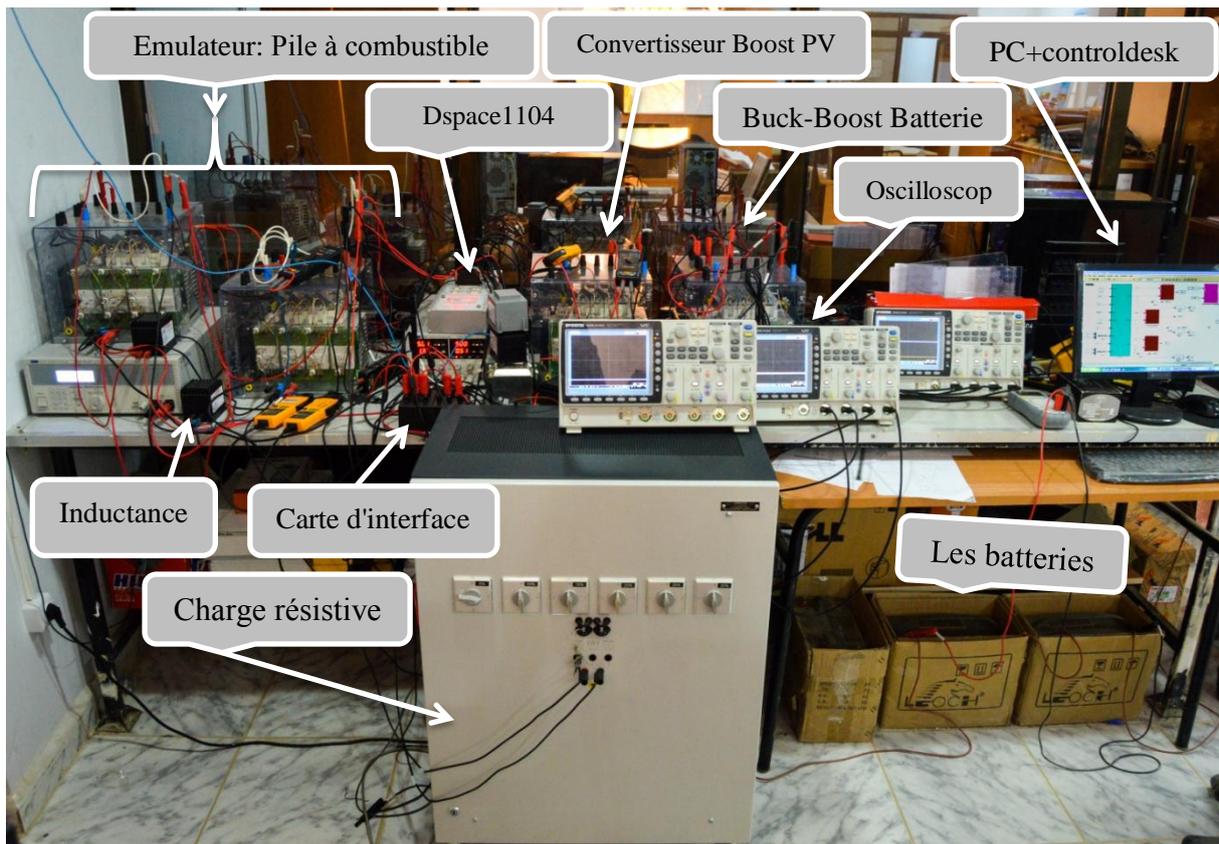


Figure 4-24 Banc d'essai expérimental

Pour le montage du banc d'essai, nous avons utilisé les composants de quatre bancs d'onduleurs, de la marque "SEMIKRON", des inductances, des capteurs de courant et de tension. Une source photovoltaïque à base des panneaux solaires placés sur un support métallique ont été utilisés. La commande est réalisée sous Matlab/Simulink, puis compilée et implantée numériquement à travers un système de développement temps réel DSPACE 1104.

#### 4.9.1.1 Les panneaux solaires

La figure 4-25 représente la source photovoltaïque employée pour notre banc d'essai. Nous avons utilisés quatre panneaux solaires afin de produire l'énergie solaire nécessaire à alimenter la charge résistive. Une topologie de deux panneaux en série et deux autres en parallèle est choisie. La caractérisation par le centre de recherche des énergies renouvelables(CDER) de chaque panneau solaire est mentionnée sur la figure ci-dessous.



Figure 4-25 Les panneaux solaires du banc d'essai expérimental

#### 4.9.1.2 Carte dSPACE DS1104

Les signaux mesurés par les capteurs de tension et de courant sont transférés par convertisseur analogique-numérique (ADC) de dSPACE DS1104 (voir annexe). Le programme contenant la loi de commande de notre système hybride développé sous Matlab - Simulink est compilé puis transféré via le logiciel "ControlDesk" vers la carte dSPACE, ensuite vers les convertisseurs (DAC) numérique-analogique. Le schéma de la carte DS1104 montre que les signaux de sortie peuvent être envoyés, soit par le convertisseur (DAC) ou bien via le port PWM. Dans notre travail ces ports ont été utilisés. Les quatre signaux de commande générés et envoyés par le port PWM de la carte dSPACE sont au format de sortie analogique (0-5 V).

#### 4.9.1.3 Mesure des signaux

Les courants et les tensions sont mesurés par les capteurs illustrés sur les figures 4-28 et 4-29. Les capteurs de courant sont à base de l'effet Hall, avec une référence i30S du producteur "FLUKE". Les capteurs de tensions ont comme référence GDP-025 de la marque "GWINSTEK".

#### 4.9.1.4 Carte d'interface

Parce que les signaux de la commande des grilles des IGBT de l'onduleur utilisé sur notre banc d'essai, doivent être implémentés à 15V et que les sorties de la phase de génération des signaux PWM sont à 5V ; donc il a été nécessaire de réaliser, une carte d'interface permettant l'amplification des signaux de commande de la gamme  $[0 \div 5V]$  vers une gamme  $[0 \div 15V]$ . Cette carte a été réalisée au sein de notre laboratoire, elle permet d'assurer la diminution au niveau des parasites entre les IGBT et le dSPACE, comme elle assure aussi une protection des modules IGBT de l'onduleur contre les dégâts en cas de mauvaise exploitation de ces derniers. Notre carte est équipée d'un circuit principal le 74LS17, et d'un circuit auxiliaire le 74LS00, ce dernier est employé afin de permettre l'élévation du niveau de tension à la sortie de la carte.

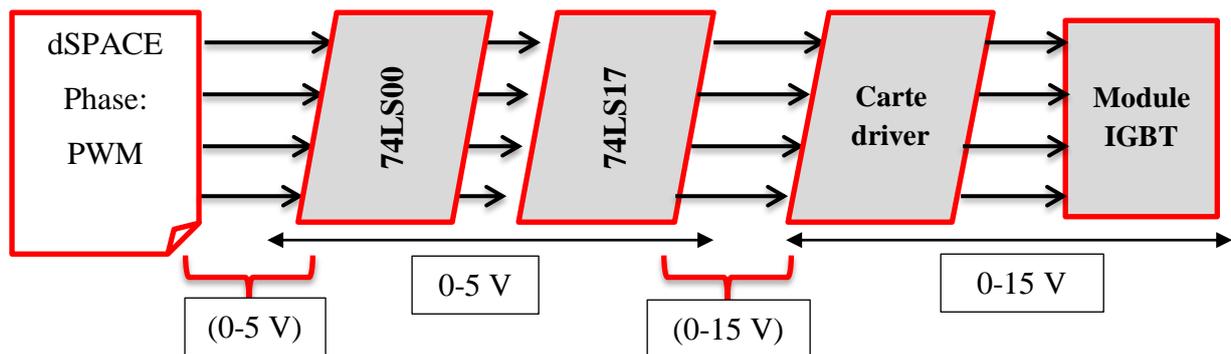


Figure 4-26 Schéma synoptique de carte d'interface.

#### 4.9.1.5 L'émulateur de la pile à combustible

L'émulateur est conçu pour remplacer la partie électrique seule avec un vraie pile à combustible de type PEM 500W dans le système hybride, l'émulation électrique est réalisée par un convertisseur DC/DC type « Buck », ce convertisseur est commandé par un régulateur mode glissant, implémenté dans le système dSPACE, son alimentation est assurée par une tension stabilisée. Le schéma de commande est donné par la figure 4-27.

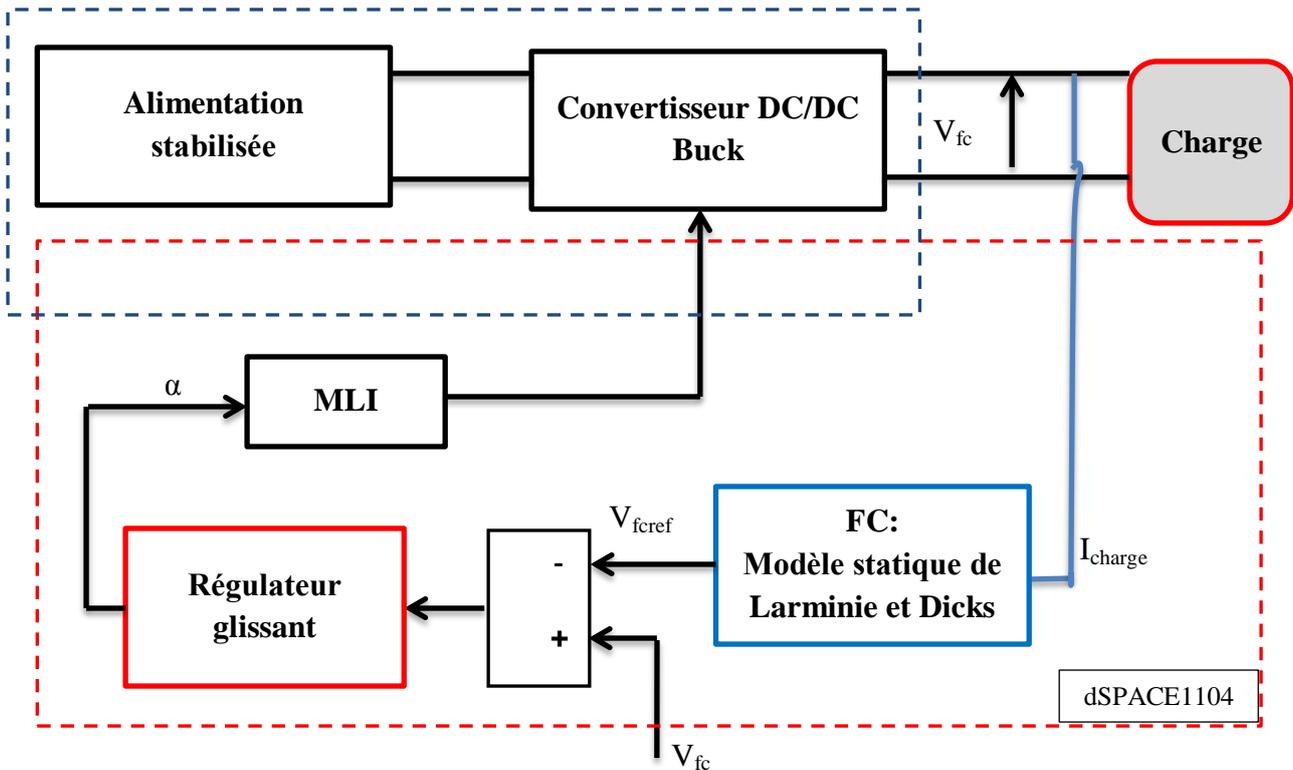


Figure 4-27 Architecture de l'émulateur électrique

La figure ci-dessus montre que le convertisseur est connecté à une charge active, le courant de charge  $I_{charge}$  est mesuré et sa valeur est renvoyée à la formule du modèle statique de « Larminie et Dicks ». En partant de notre courant de charge mesuré ( $I_{charge}$ ), la tension de sortie  $V_{fc}$  correspondante à la pile à combustible est calculée par le modèle suscité, puis sa valeur est renvoyée au régulateur de tension par mode glissant comme une tension référence. Ensuite, le régulateur intégré régule la tension de sortie du convertisseur à la tension de sortie désirée.

#### 4.9.2 Résultats expérimentaux

Nous allons présenter dans cette section, les résultats des différents tests expérimentaux effectués sur notre système hybride. La commande proposée étant implantée numériquement sous l'environnement de Matlab-Simulink ainsi que la carte temps réelle dSPACE1104. La fréquence d'échantillonnage est de 10KHz.

Selon l'équipement disponible de notre laboratoire MSE, la tension du bus continu ayant une valeur de 120 V lors de la simulation, a été réduite et ajustée à 48V en pratique (valeur normalisée). Une utilisation de deux batteries en série de 12V (24V au total) ; des inductances de 1mH avec une capacité du bus continu  $C_{bus} = 1100\mu F$ . Les tests proposés sont les suivants:

1. Etat initial, on démarre le système par une valeur de charge de 75W ; le système peut être alimenté par la source principale PV (les panneaux solaires pour l'expérimental).
2. En partant de l'état de charge de 75 W, on provoque une augmentation de charge avec 130% (augmentation avec un échelon positif), d'où la puissance demandée devient supérieure à la puissance fournie, autrement dit supérieure à la puissance de notre source principale, sachant que cette dernière a été limitée à 150W.
3. Remise à zéro du système, puis redémarre à partir d'une valeur de charge importante de 200W, ayant toujours notre source principale limitée à 150W.
4. En partant de la charge 200 W, on diminue celle-ci de 130% de sa valeur initiale (échelon négatif), tout en gardant notre source PV limitée à 150W.

#### 4.9.2.1 Tests et Essais des régulateurs de courant

Afin de vérifier le fonctionnement désiré des régulateurs de courant par mode glissant, employé pour les trois sources de notre système hybride, des différents tests ont été réalisés, dans lesquels, on fait varier le courant de référence et on observe la réponse des courants de chaque convertisseur associé aux sources utilisés.

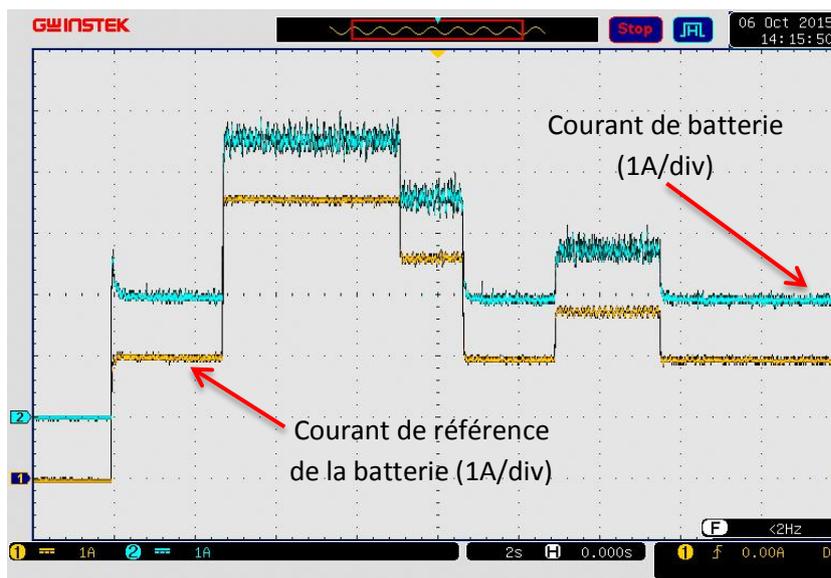


Figure 4-28 Test et Evolution de courant de batterie après la variation de son courant de référence

La figure 4-28 représente l'évolution du courant de batterie après variation du courant de référence de 0 à 2A, 2 à 4.5A, 4.5 à 3.5A, 3.5 à 2A, 2 à 3A et de 3 à 2A respectivement, on

observe que le courant de la batterie traque parfaitement sa référence, sans aucun dépassement avec un dynamique très rapide, ce qui montre l'utilité et l'efficacité du régulateur glissant utilisé.

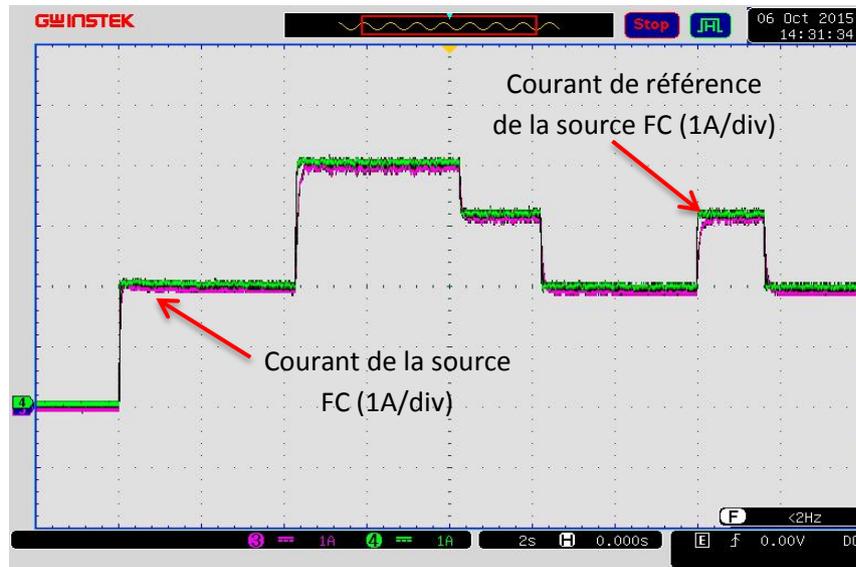


Figure 4-29 Evolution de courant de l'émulateur "pile à combustible" après la variation de son courant de référence

La figure 4-29 représente l'évolution du courant de l'émulateur "pile à combustible" pour des divers variations de son courant de référence de 0 à 2A, 2 à 4A, 4 à 3A, et 3 à 2A respectivement, identiquement au régulateur de courant de la batterie, on constate que le courant de l'émulateur suit parfaitement sa référence.

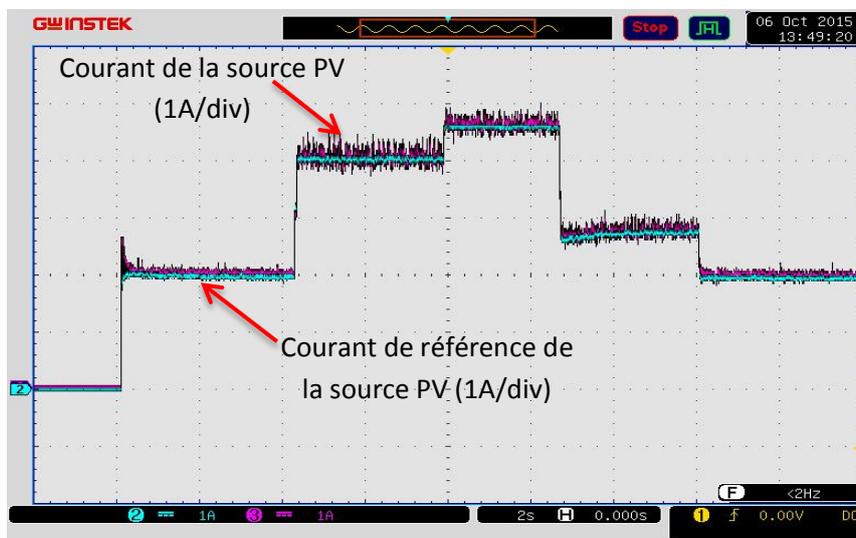


Figure 4-30 Evolution de courant de la source photovoltaïque après la variation de son courant de référence

La figure 4-30 montre le bon contrôle du courant de la source photovoltaïque, avec lequel, on peut remarquer que le courant de la source PV traque parfaitement sa référence pendant plusieurs changements subit à cette dernière de 0 à 2A, 2 à 4A, 4 à 4.5A, 4.5 à 2.5A, 2.5 à 2A respectivement.

#### 4.9.2.2 Résultats expérimentaux de l'algorithme MPPT

L'algorithme MPPT (Maximum power point tracking) ou bien suivi du point maximal de puissance a été testé pour la source photovoltaïque utilisée. L'approche P&O (perturbe and observe) a été employée. Pour divers changements dans la charge, les résultats suivants ont été obtenus:

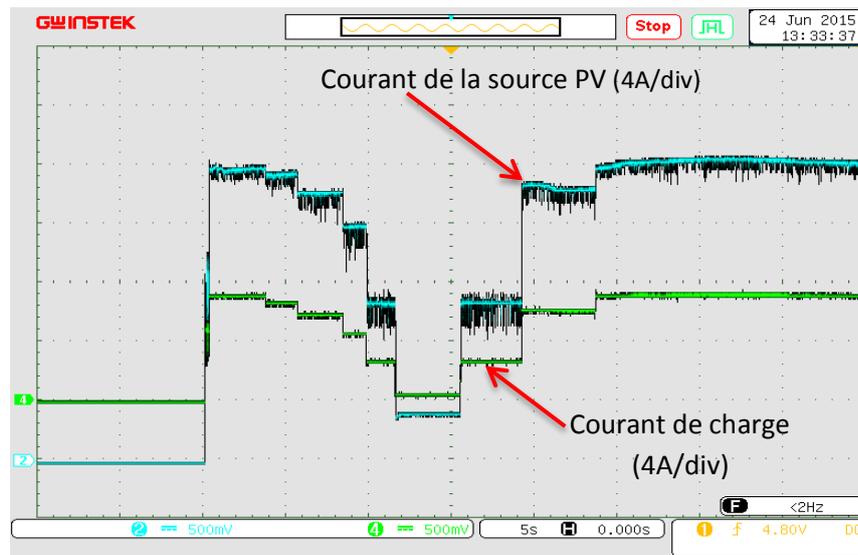


Figure 4-31 Evolution de courant de la source photovoltaïque pendant le test MPPT

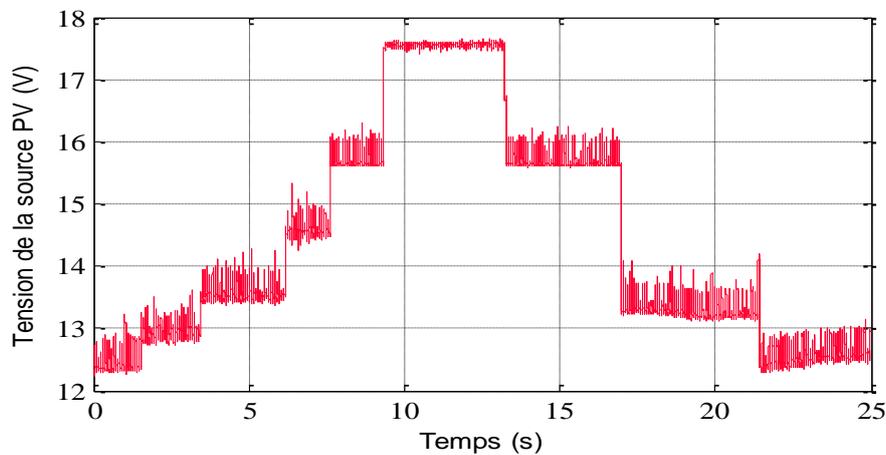


Figure 4-32 Tension de la source photovoltaïque pendant le test MPPT

Les figures 4-31 et 4-32 montrent la bonne performance de l'approche (P&O) préposée pour le suivi du point maximal de puissance pendant que l'algorithme subissait divers changements de charge. Une traque de puissance maximale pour chaque valeur de courant demandé est obtenue ce qui prouve l'efficacité de notre algorithme MPPT utilisé.

#### 4.9.2.3 Résultats expérimentaux de la gestion d'énergie

Nous exposons dans cette partie les résultats qui ont été obtenues pendant les tests et les essais des scénarios discutés dans la section précédente.

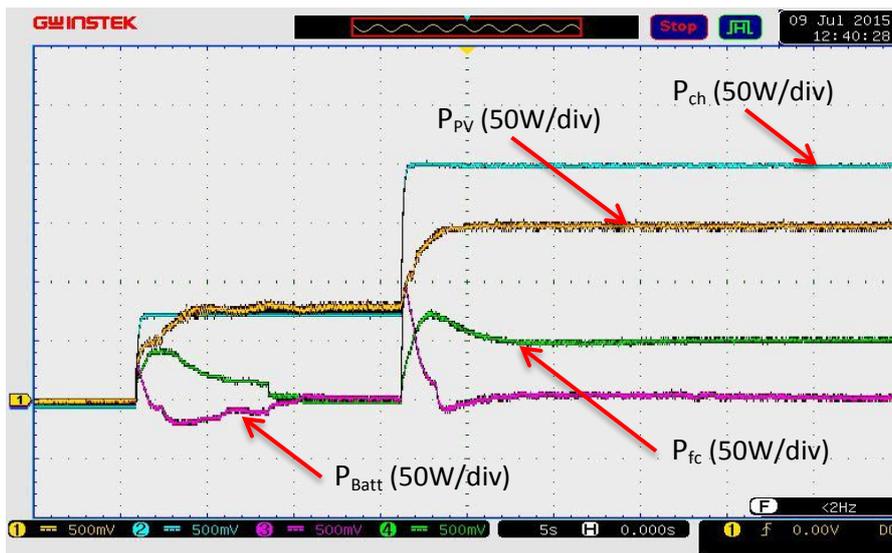


Figure 4-33 Gestion de l'énergie du système hybride [scénario 1 et 2]

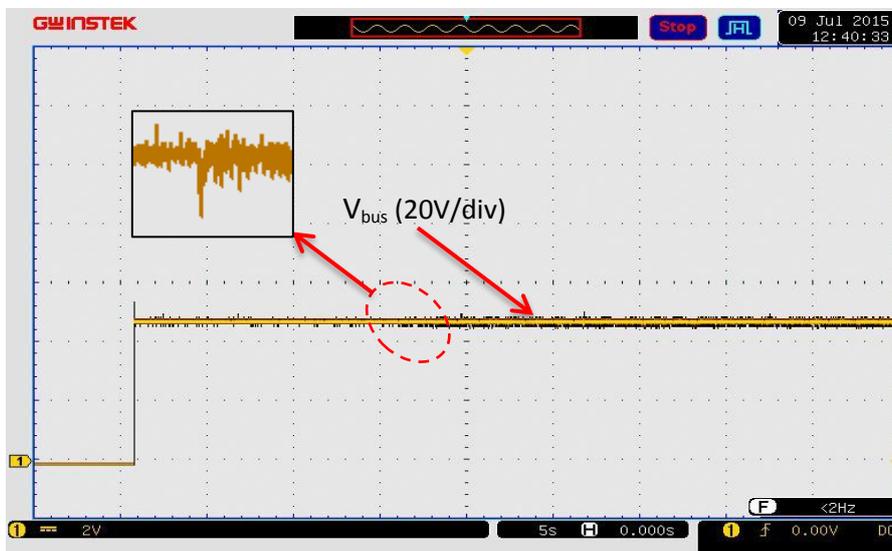


Figure 4-34 Tension de bus continue [scénario 1 et 2]

La figure 4-33 révèle la gestion de l'énergie entre les trois sources constituant notre système hybride expérimenté. Sur cette figure, tirée de notre oscilloscope, on observe les deux scénarios discutés précédemment, dans lesquels, le démarrage du système hybride commençait par un état initial de charge alimenté via la source PV (considéré comme source primaire). L'énergie produite par les panneaux solaires répond à la demande de la charge, ce qui fait que la puissance de l'émulateur "pile à combustible" et celle de la batterie tendent vers le zéro. Durant le deuxième scénario, la puissance fournie par la source photovoltaïque a été limitée à 150W simulant un manque d'éclairement solaire (mauvaises conditions climatiques), on observe que l'émulateur de la pile commence à produire une énergie supportant celle des panneaux solaire afin de satisfaire la demande de charge. Le comportement de la batterie reflète son rôle de stabilisation de la tension de sortie et couvre le manque d'énergie durant les régimes transitoires provoqués par les changements de la charge.

En outre, la figure 4-34 expose la tension du bus continu ajusté à 48V. La figure montre la bonne performance de la commande par platitude au niveau de la régulation de tension. A l'instant  $t=14s$ , le système subit une variation de charge avec un échelon positif (130% de sa valeur initiale), on remarque que l'erreur statique est de moins de 0.33% (0.16V).

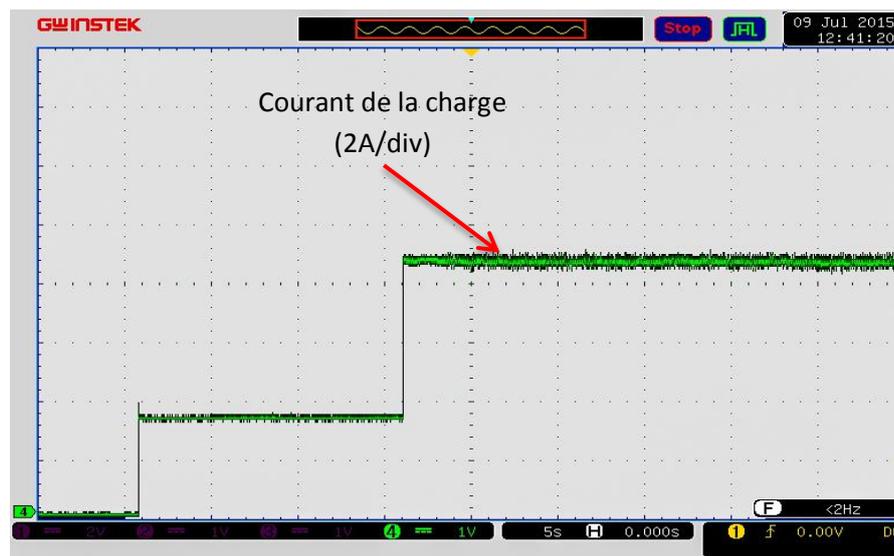


Figure 4-35 Courant de la charge [scénario 1 et 2]

La figure 4-36 montre l'énergie du bus continu et sa référence, on constate que l'on a eu un bon fonctionnement de la commande appliquée au niveau de régulation de tension du bus continu, ce qui est reflété sur l'énergie de ce dernier, où nous remarquons une bonne poursuite de l'énergie du bus à sa référence.

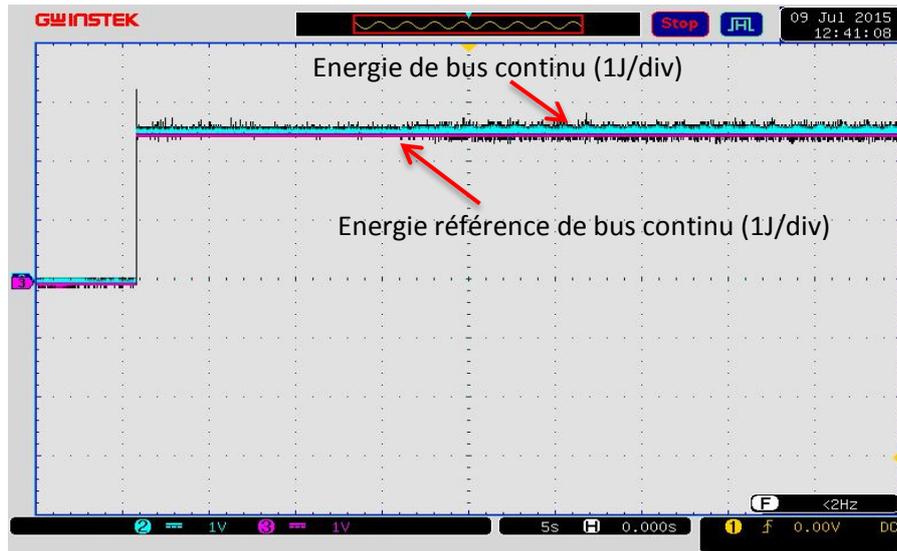


Figure 4-36 Energie de bus continu et sa référence [scénario 1 et 2]

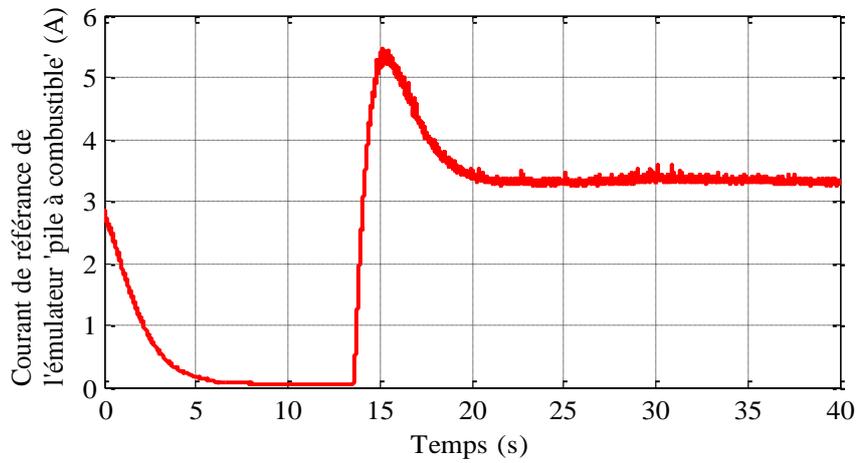


Figure 4-37 Courant de référence de l'émulateur FC [scénario 1 et 2]

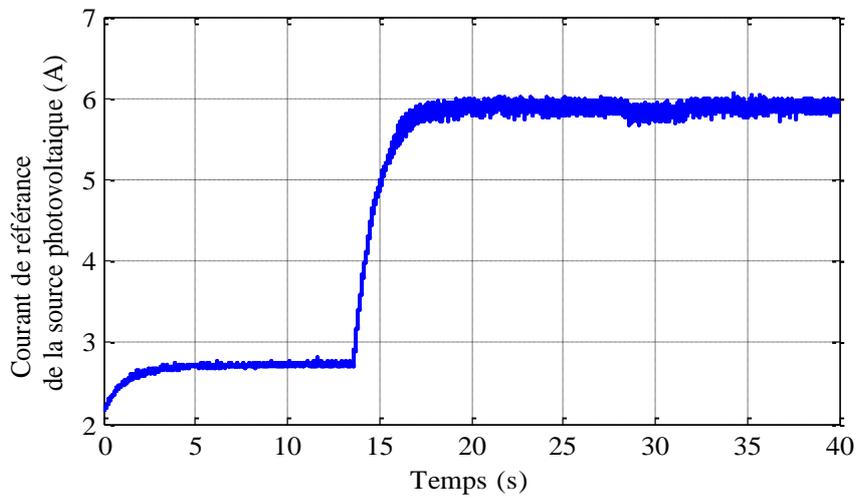


Figure 4-38 Courant de référence de la source PV [scénario 1 et 2]

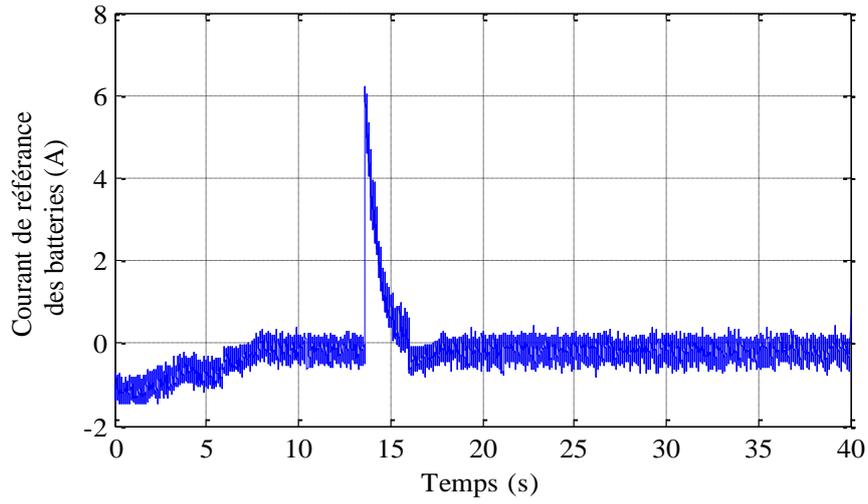


Figure 4-39 Courant de référence de la batterie [scénario 1 et 2]

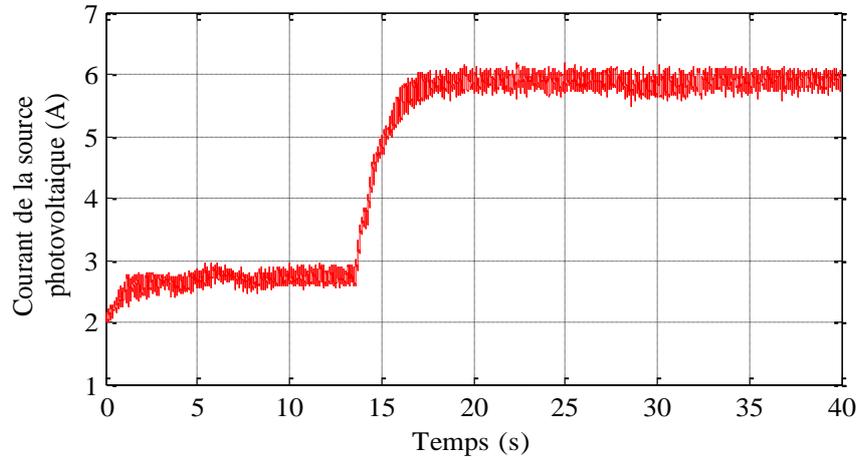


Figure 4-40 Courant de la source PV [scénario 1 et 2]

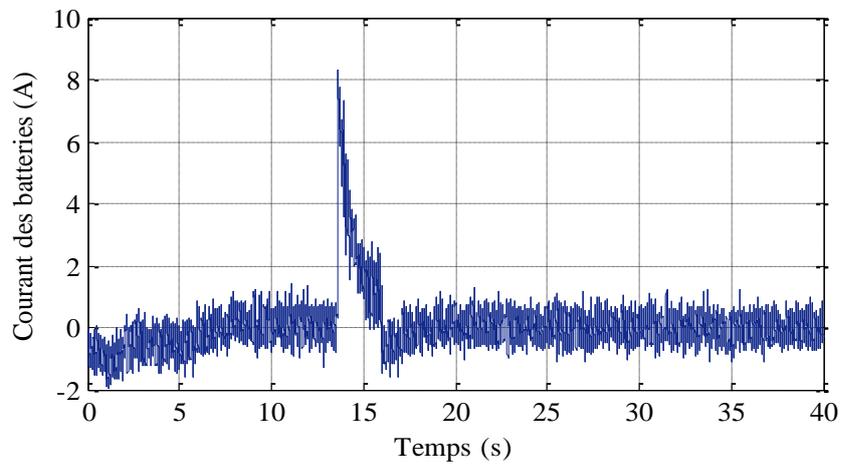


Figure 4-41 Courant de la batterie [scénario 1 et 2]

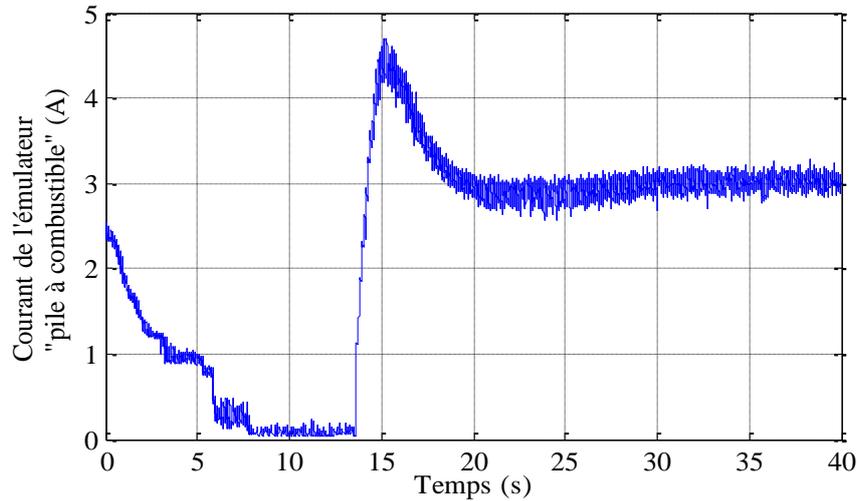


Figure 4-42 Courant de l'émulateur FC [scénario 1 et 2]

Les figures 4-37, 4-38, 4-39 montrent les courants de référence des trois sources de notre système hybride expérimenté. Par ailleurs les figures 4-40, 4-41, 4-42 montrent les courants produits par ces mêmes sources. On observe que ces courants traquent sensiblement ses références avec des dépassements acceptables. La production du courant des batteries reflète son comportement dans le système, pendant lequel, on a eu une réponse relativement rapide couvrant les instants transitoires durant les variations de la charge.

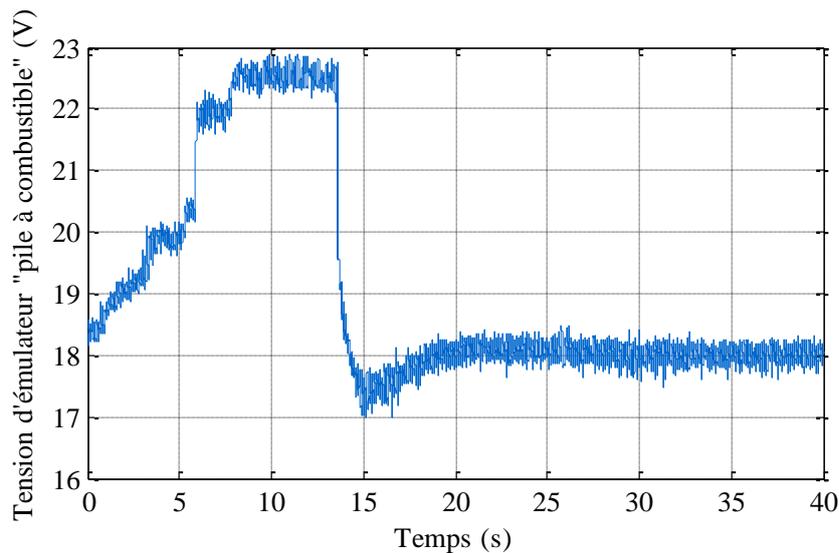


Figure 4-43 Tension de l'émulateur FC [scénario 1 et 2]

La figure 4-43 dévoile l'évolution de la tension de notre pack émulé. Durant le régime  $t = [7 \div 14]$  s, où le courant produit par l'émulateur est nul, on constate que la valeur de la tension atteint sa valeur nominale ce qui signifie la bonne émulation de notre source FC.

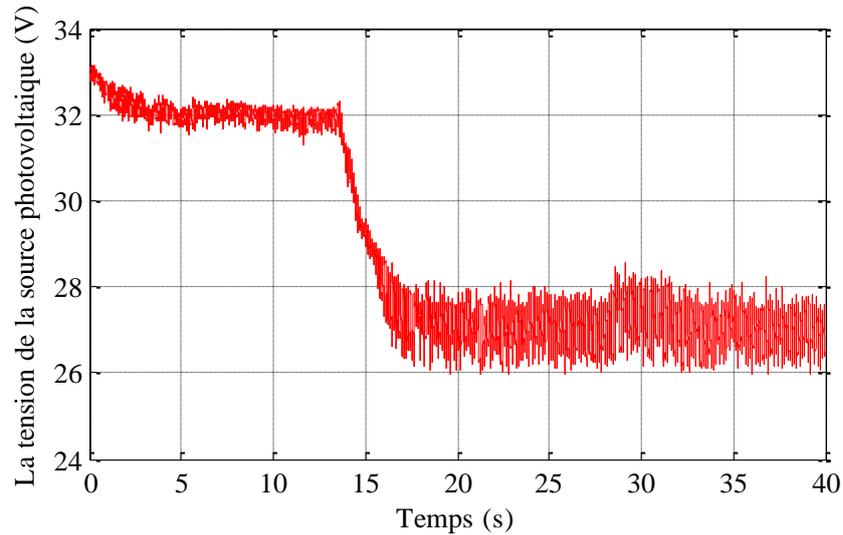


Figure 4-44 Tension de la source PV [scénario 1 et 2]

La figure 4-44 montre la tension de la source photovoltaïque, les tensions obtenues ainsi que le courant de cette source ont été recueillis par le programme de contrôle reliant les signaux de commande de l'algorithme MPPT et la commande plate.

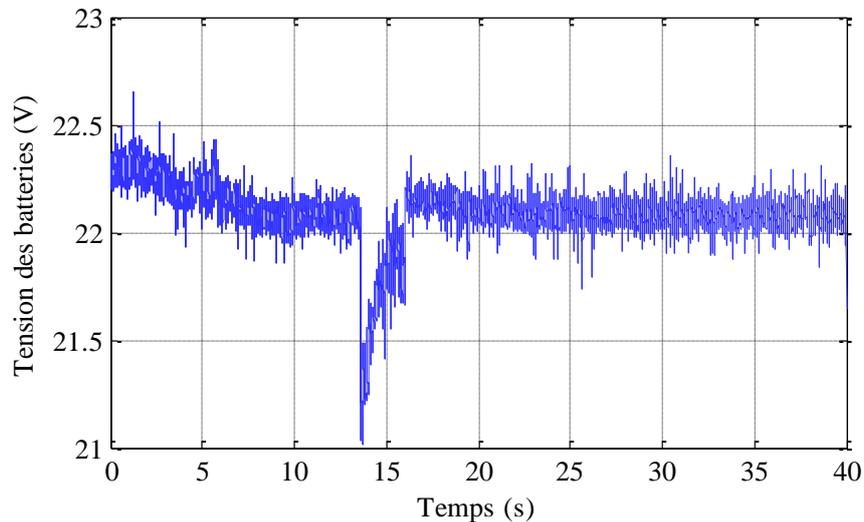


Figure 4-45 Tension des batteries [scénario 1 et 2]

La figure 4-45 révèle la tension des batteries pendant le fonctionnement du système hybride. La tension nominale est considérée égale à 22V, due à la valeur initiale de cette dernière à l'instant du lancement du système. Ce cas-là, prouve la robustesse et l'efficacité de notre commande employée.

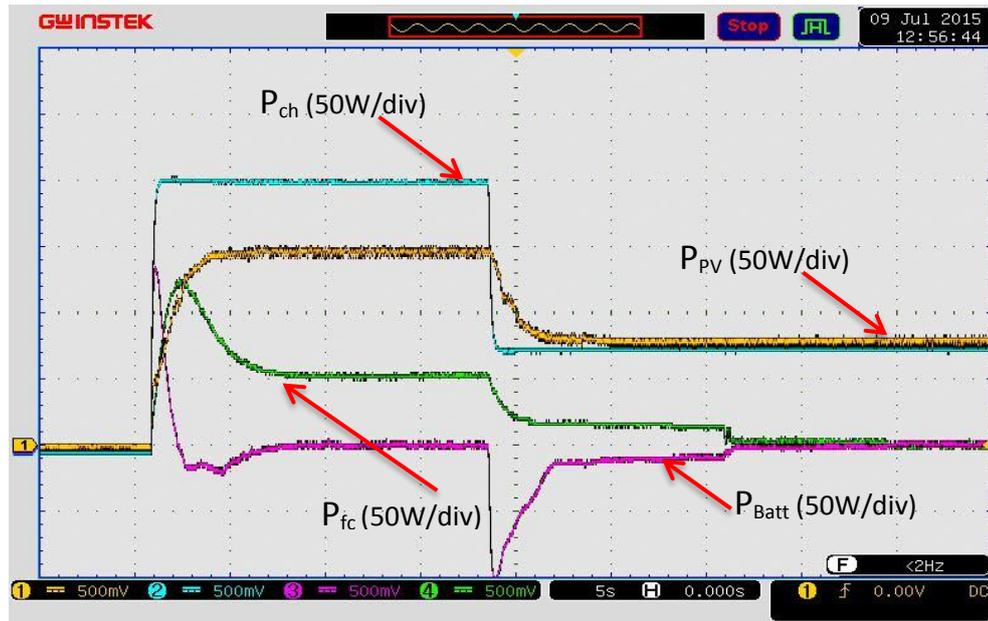


Figure 4-46 Gestion de l'énergie du système hybride [scénario 3 et 4]

La figure 4-46 présente la gestion de l'énergie entre les trois sources formant notre système hybride expérimenté à savoir, les panneaux solaires, l'émulateur de la pile à combustible et les batteries. D'après l'analyse de cette figure exposant le troisième et le quatrième scénario proposés, on trouve que notre commande employée afin de gérer le flux de puissance entre ces sources a achevé son objectif avec une marge d'erreur acceptable.

Le démarrage du système hybride était par un état initial de charge qui ne peut pas être alimenté par la source PV (où la puissance fournie par la source photovoltaïque a été limitée à 150W simulant un manque d'éclairage solaire), par la suite, la commande a orienté le pack émulé pour supporter la puissance produite par la source photovoltaïque.

L'énergie produite par les batteries tend vers le zéro. Durant le quatrième scénario, la charge diminue avec un échelon négatif, on observe que l'émulateur de la pile tend vers le zéro, la batterie absorbe le surplus de puissance dans le système pendant que celle des panneaux solaires alimente la demande de charge. Pendant les régimes transitoires, le comportement de la batterie joue un rôle de stabilisation de la tension bus continu et absorbe le surplus d'énergie.

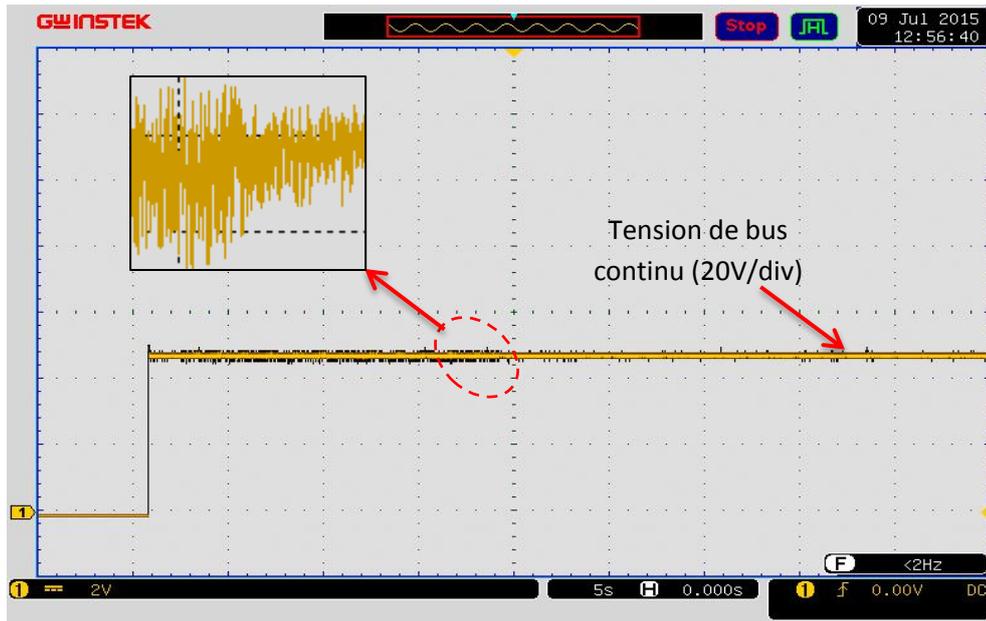


Figure 4-47 Tension de bus continu [scénario 3 et 4]

La figure 4-47 illustre la tension du bus continu ajusté à 48V dans le troisième et le quatrième scénario. Une bonne performance de la commande par platitude au niveau de la régulation de la tension a été observée. La perturbation de tension pendant que le système subit une variation de charge (échelon négatif: 130% de sa valeur initiale) ne dépasse pas les contraintes imposés au cahier de charge (2V). Une erreur statique moins de 0.41% (0.20V).

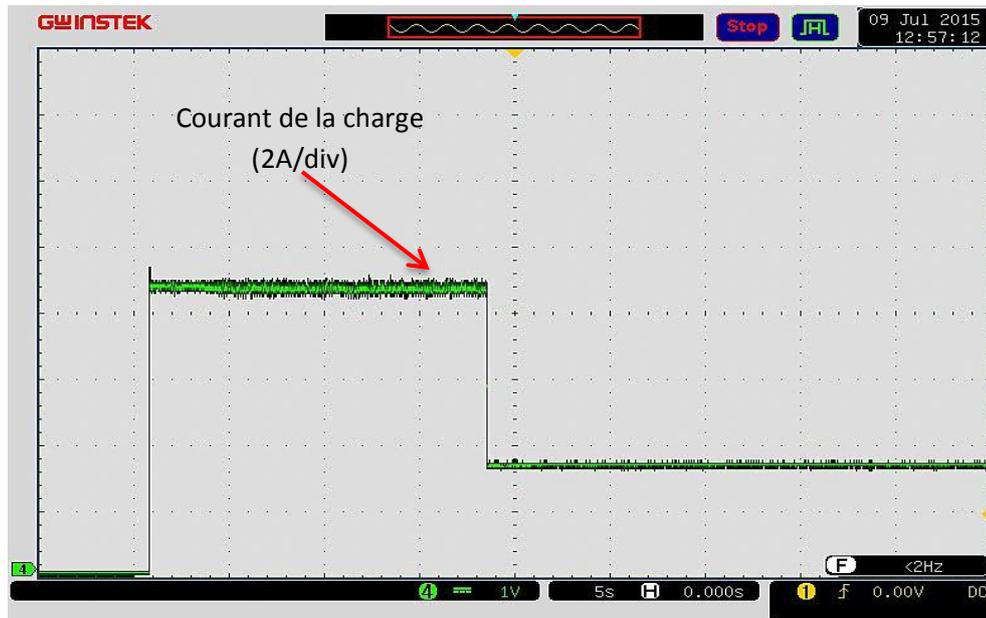


Figure 4-48 Courant de charge [scénario 3 et 4]

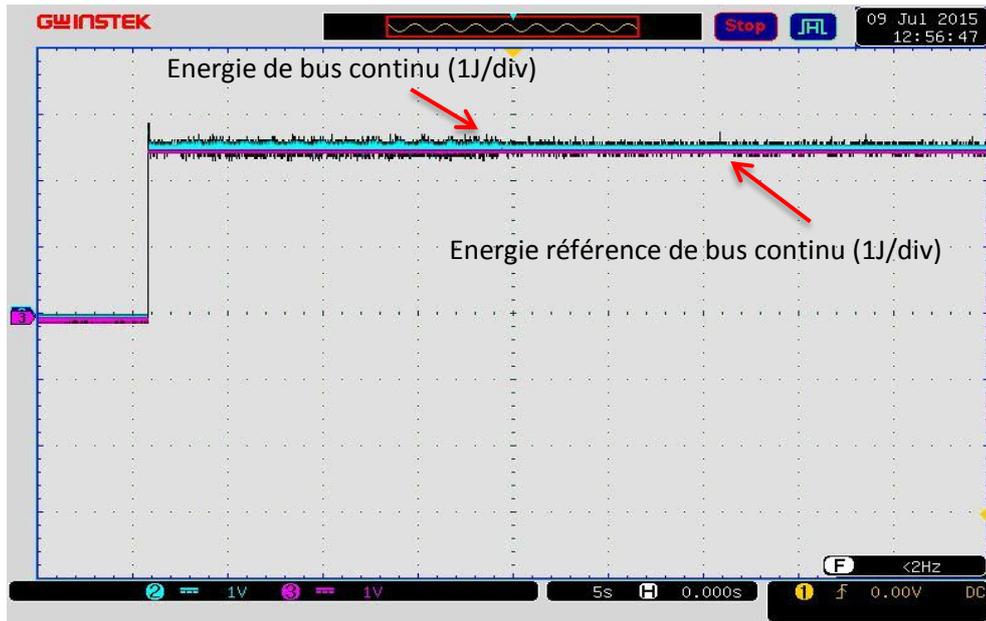


Figure 4-49 Energie de bus continu et sa référence [scénario 3 et 4]

La figure 4-49 représente l'énergie du bus continu et sa référence pendant le troisième et le quatrième scénario de fonctionnement de notre système hybride. La figure nous montre qu'on a eu une bonne performance de la commande par platitude sur la régulation de tension du bus continu, où l'énergie du bus continu traque parfaitement sa référence, en engendrant un ajustement de la tension désirée (48V).

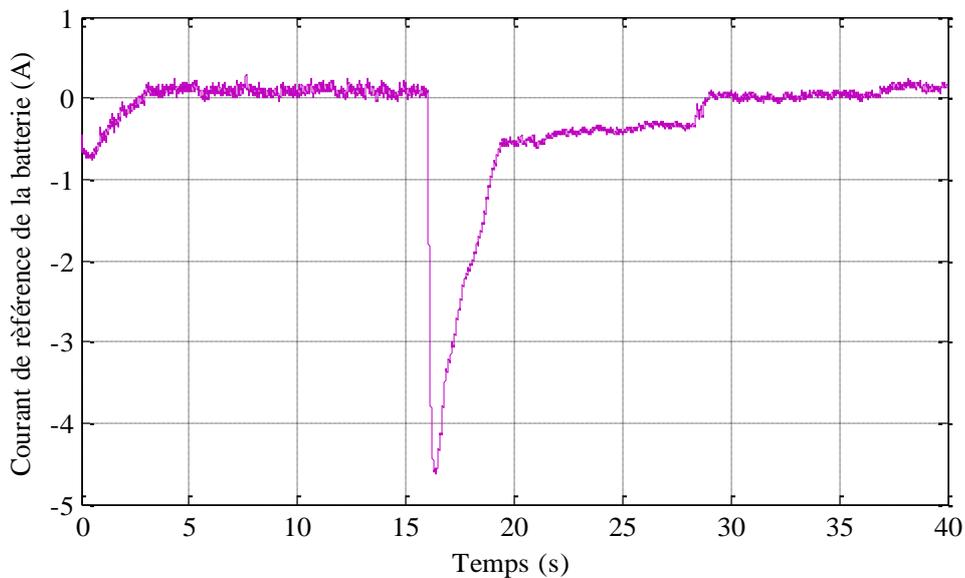


Figure 4-50 Courant de référence de la batterie [scénario 3 et 4]

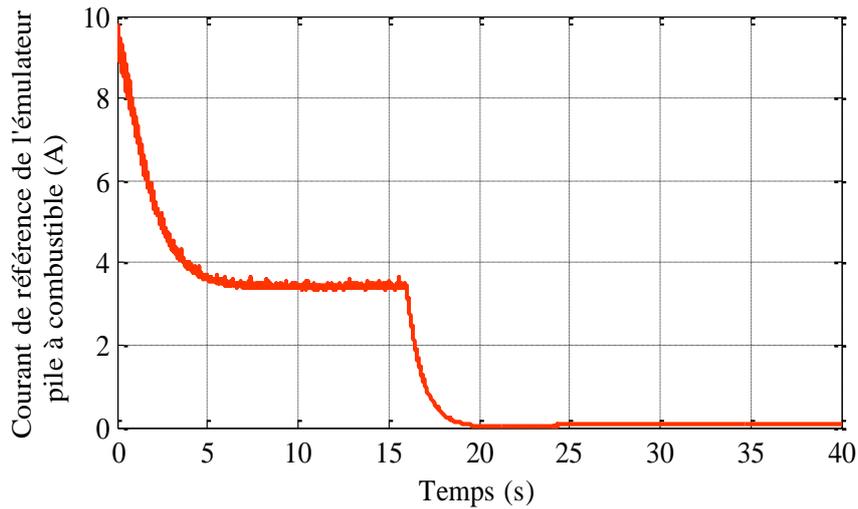


Figure 4-51 Courant de référence de la source FC émulé [scénario 3 et 4]

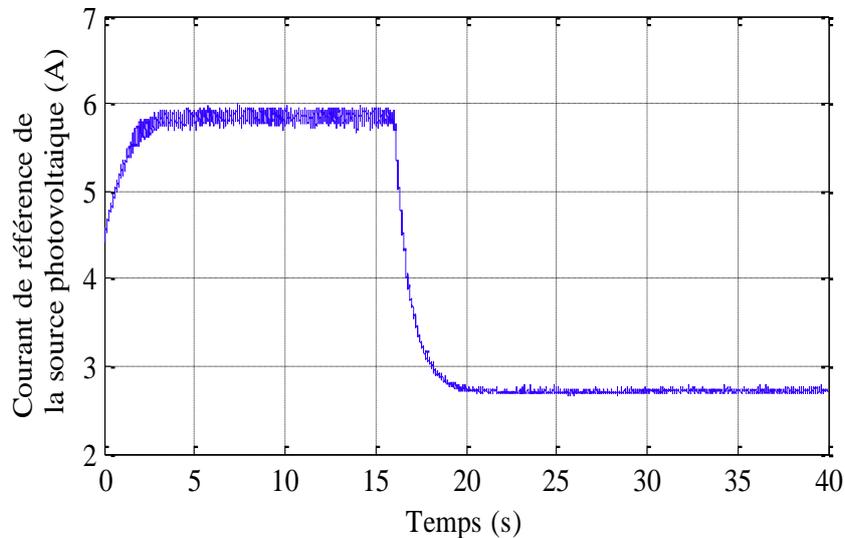


Figure 4-52 Courant de référence de la source PV [scénario 3 et 4]

Les figures ci-dessus représentent les courants des références commandant les trois sources d'énergies utilisées, et qui ont été obtenues avec l'extension (.mat) extrayant du logiciel Control Desk de notre dSPACE1104. Ces courants dérivés d'après le bloc de commande par platitude, ont été par la suite introduit dans les régulateurs par mode glissant dans le but de générer les signaux de contrôle des convertisseurs associés aux sources.

Les courants produits par nos différentes sources peuvent être donnés par les figures suivants, ces courants ont été mesurés via les capteurs de courant mentionné précédemment.

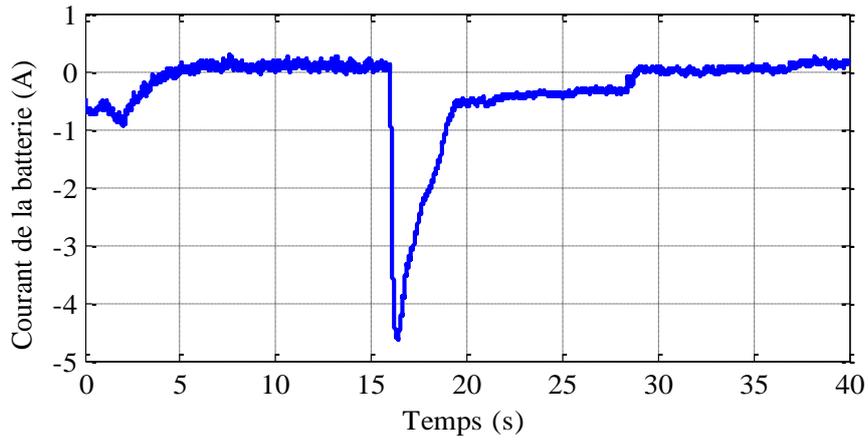


Figure 4-53 Courant de batterie [scénario 3 et 4]

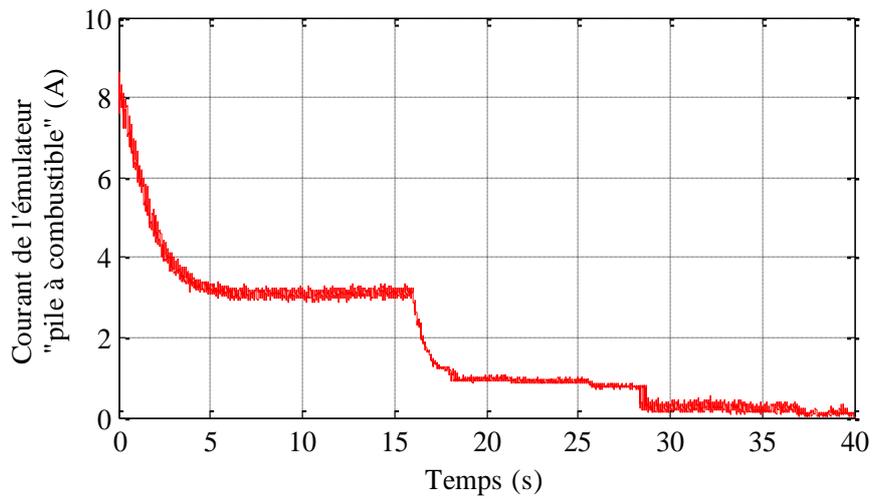


Figure 4-54 Courant de l'émulateur de stack [scénario 3 et 4]

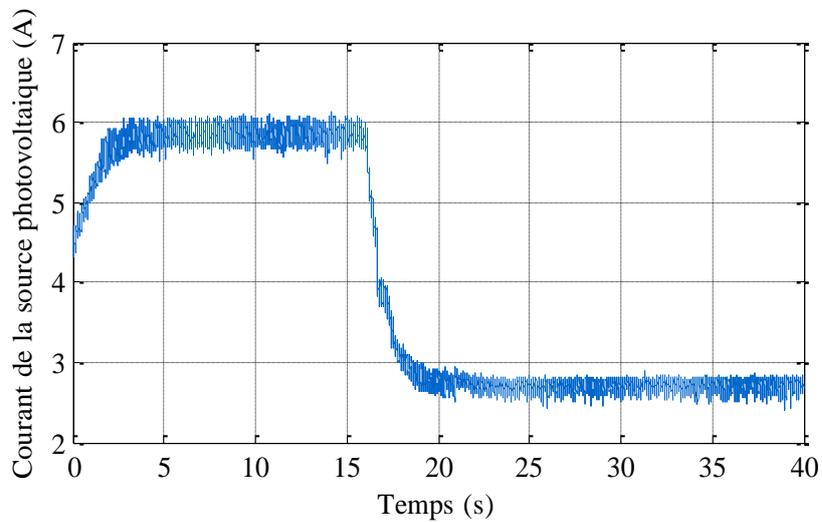


Figure 4-55 Courant de la source photovoltaïque [scénario 3 et 4]

Les figures 4-50, 4-51, 4-52 présentent les courants de référence générés par la commande plate pour les trois sources de notre système hybride. De plus, les figures 4-53, 4-54, 4-55 nous montrent les courants provenant de la batterie, de l'émulateur de stack FC, ainsi que des panneaux solaires. On observe que ces courants suivent impeccablement leurs références avec une marge d'erreur acceptable. Dans ce cas aussi, la production du courant des batteries traduit son rôle dans le système, où, nous remarquons la réponse rapide, et une forte dynamique pour couvrir les régimes transitoires durant les variations de la charge.

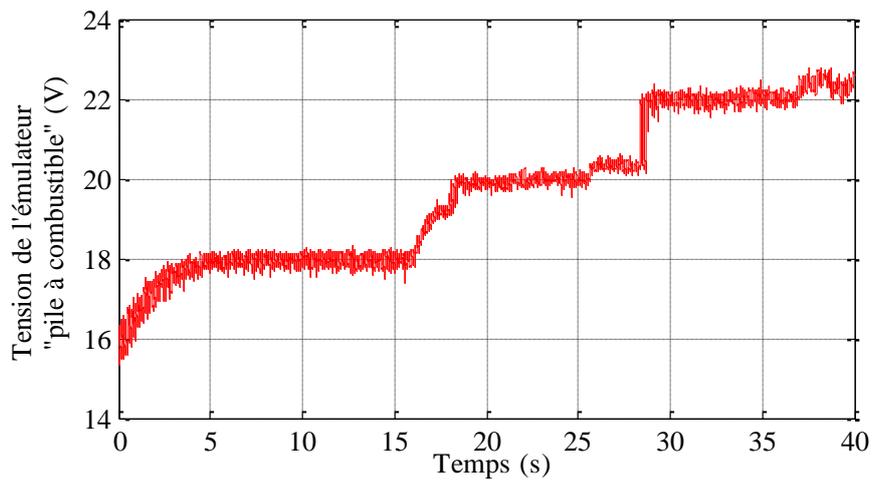


Figure 4-56 Tension de l'émulateur de stack [scénario 3 et 4]

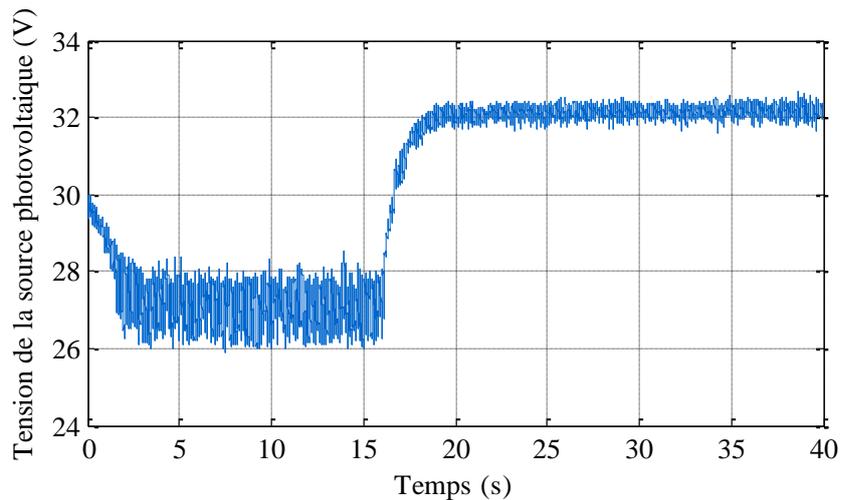


Figure 4-57 Tension de la source PV [scénario 3 et 4]

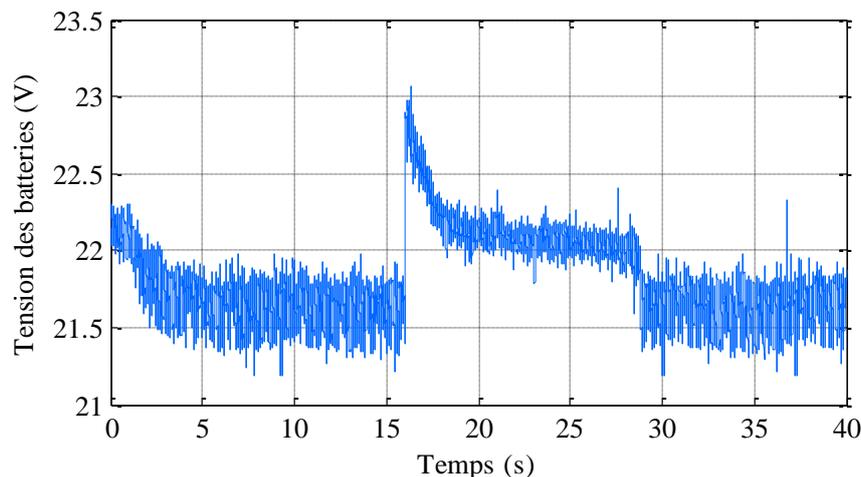


Figure 4-58 Tension de la batterie [scénario 3 et 4]

Les figures 4-56, 4-57, 4-58 illustrent les formes d'onde de tension des trois sources, à savoir, l'émulateur de notre pack FC, la source photovoltaïque et la batterie respectivement. La tension de sortie de la batterie atteint sa valeur nominale considérée (21.5). Les tests expérimentaux, montrent la bonne performance aussi de pack FC émulé à cause de sa valeur nominal obtenue pendant que le courant de la pile s'annule.

#### 4.10 Conclusion

Dans ce chapitre, les convertisseurs «Boost» et « Buck-Boost» associés aux sources dans notre système hybride ont été modélisés en utilisant l'approche « moyen en petits signaux » pour contribuer à la description mathématique ainsi que la conception optimale de la commande de ce système. Nous avons abordé la conception du système hybride proposé, son modèle mathématique et la commande par platitude appliquée, dans laquelle, la définition et les contraintes de cette dernière ont été discuté. Les formules mathématiques décrivant la commande plate sont présentées, également les formules révélant la preuve de platitude de notre système et les signaux de commande des convertisseurs. Nous avons analysés aussi l'utilisation des contrôleurs par mode glissant, en tirant ses équations de contrôle adaptées aux différents convertisseurs associés. On a dimensionné le système hybride et ces différents convertisseurs afin de passer à l'étape de simulation, qui était implémentée sous l'environnement de Matlab-Simulink. Les résultats obtenus de notre commande présente des résultats intéressants, soit au niveau de la régulation de tension sur le bus continu, où bien concernant la gestion de l'énergie produite par les diverses sources. Plusieurs scénarios sont examinés et analysés pour la gestion du flux de puissance générée par le système hybride. Les résultats des différents scénarios proposés à la simulation montrent que notre approche basé

sur la notion de platitude s'avère très robuste vis-à-vis des fortes variations de charge ou paramétriques avec une haute dynamique qui nous permet d'obtenir un système très stable et qui répond aux exigences des micro-smart grid.

Des validations expérimentales ont été réalisées sur un banc d'essai au sein de notre laboratoire MSE avec une tension réduite du bus continu. Les tests effectués pour des différents scénarios nous ont prouvé la bonne performance de notre approche basé sur la notion de platitude. La gestion de l'énergie, la tension du bus continu ainsi que tous les objectifs déterminés sont achevés. Les résultats obtenus peuvent être projetés à des autres niveaux de tension convenable aux applications de smart grid.

*Conclusion générale  
et Perspectives*

## Conclusion Générale et Perspectives

L'objectif principal de cette thèse était de développer un gestionnaire d'énergie pour un système hybride qui se compose de trois différentes sources renouvelables, à savoir les panneaux solaires, les éoliennes, et la pile à combustible, en utilisant deux différents dispositifs de stockage, ce système est commandé, modélisé et dimensionné afin d'être destiné à une application d'alimentation autonome d'un micro smart grid.

Afin de pouvoir évaluer son performance et son comportement, les trois sources renouvelables qui composent notre système hybride ont été étudiées dans un premier chapitre, dont les différents types des panneaux solaires, ses caractéristiques et ses modélisations ont été représentés. Puis, nous avons présenté des rappels sur la production d'énergie électrique par une éolienne, ainsi que les diverses catégories de cette dernière. Ensuite, nous avons exposé notre troisième source (la pile à combustible) par son principe de fonctionnement, son rôle et ces avantages et inconvénients. Les accumulateurs chimiques et les supercondensateurs ont été représentés aussi dans ce premier chapitre, leur modèle mathématique employé et ses circuits équivalents ont été donnés. Tout ce qui est discuté sur le premier chapitre nous a orienté à choisir la bonne conception de fonctionnement de notre système hybride, où les générateurs photovoltaïques et les éoliennes ont été choisis comme une source de production primaire grâce à leurs énergies spécifiques élevées. D'autre part, son intermittence aux conditions climatiques nous a menés vers un ajout d'une troisième source afin d'augmenter la fiabilité de notre système hybride. Cependant, les supercondensateurs et les batteries ont été employés, respectivement, comme sources auxiliaires et un système de backup.

Les accumulateurs chimiques (batteries) dans ce travail ont été considérés comme une autre source d'énergie, également ils peuvent être destinés au stockage afin d'améliorer le comportement de notre système hybride en régime permanent. Les supercondensateurs ont été employés comme une source de puissance grâce à ses fortes densités d'énergie et ses dynamiques rapides dans les régimes transitoires.

Dans la seconde partie de cette thèse qui concernait le concept d'un smart grid, micro smart grid et les systèmes hybrides avec ses différentes méthodes d'optimisation, nous avons représenté une méthodologie de conception du dimensionnement optimal en appliquant une optimisation technique-économique à base des algorithmes génétiques sur un système hybride

photovoltaïque-éolienne afin de démontrer la rentabilité des systèmes hybrides. L'utilisation d'une hybridation de trois sources a été justifiée aussi dans cette partie de travail. Les résultats obtenus ont prouvé la rentabilité de ces systèmes dans les applications autonomes par rapport aux systèmes qui utilisent qu'un seule type des ressources renouvelables.

Dans le dernier chapitre, nous avons modélisé et dimensionné les convertisseurs «Boost» et « Buck-Boost» associés aux différentes sources constituant notre système hybride. L'approche de modélisation « moyen en petits signaux » a été utilisé. La définition et le modèle mathématique du système, la commande par platitude appliquée par ses formules des signaux de contrôle et les contraintes techniques imposées ont été exposé. Afin de réguler les courants des convertisseurs, le mode glissant était employé dans ce travail. Les résultats de simulation ont montré une bonne performance de notre gestionnaire d'énergie avec une erreur statique au niveau de la tension de sortie du bus continu, qui est régulé à 120V, ne dépassait pas le 0.02%. L'implémentée sous l'environnement de Matlab/Simulink avec plusieurs scénarios nous a permis d'examiner et étudier le comportement et la performance de notre gestionnaire qui a pour objectif de gérer le flux de puissance générée par le système hybride. Ces résultats aussi ont montré que notre approche établie sur la notion de platitude se contrôle de manière très robuste, avec laquelle, nous testions le système sous de fortes variations de charge échelonnées négativement et positivement.

Des validations expérimentales ont été effectuées par un banc d'essai au sein de notre laboratoire MSE avec une tension réduite du bus continu (48V). Les tests effectués pour des différents scénarios ont été pilotés par une carte dSPACE1104. Un émulateur d'une pile à combustible était réalisé afin de simuler le comportement d'un stack PEMFC de 500W.

Enfin, des perspectives de ce travail qui peuvent être distinguées dans le but d'améliorer ce genre de systèmes sont citées ci-dessous:

- Réalisation d'un même prototype expérimental en ajoutant une éolienne de petite échelle où son émulateur.
- Améliorer la méthodologie du dimensionnement optimal en ajoutant la pile à combustible, consommation d'hydrogène et les supercondensateurs à l'algorithme d'optimisation.
- Proposer et comparer une autre commande pour la gestion d'énergie pour ce type du système.

# Références Bibliographiques

## *Références bibliographiques*

- [1] A. Houari, "Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques," Université de Lorraine, 2012.
- [2] M. Zandi, "Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique," Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2010.
- [3] S. Ndoye, I. LY+, F. I. Barro, O. H. LEMRABOTT++, and G. Sissoko, "Modelisation et simulation sous matlab/simulink de la chaîne d'alimentation d'une station relais de télécommunications en énergie solaire photovoltaïque dans une zone isolée du réseau électrique," *Journal des Sciences J. Sci*, vol. 9, pp. 45-55, 2009.
- [4] S. A. Kalogirou, *Solar energy engineering: processes and systems*: Academic Press, 2013.
- [5] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*: John Wiley & Sons, 2011.
- [6] T. Tafticht, *Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien*: ProQuest, 2007.
- [7] I. Tegani, A. Aboubou, R. Saadi, M. Y. Ayad, and M. Becherif, "Differential Flatness Using the Predictive Neural Network Control Law for Hybrid Power System," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 5, pp. 635-647, 2015.
- [8] G. W. E. Council. (2015, 29/11/2015). *Global statistics*. Available: <http://www.gwec.net/>
- [9] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs," Université de Poitiers, 2013.
- [10] P. Gipe, *Wind energy comes of age* vol. 4: John Wiley & Sons, 1995.
- [11] W. Cao, Y. Xie, and Z. Tan, *Wind turbine generator technologies*: INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [12] M. Singh and S. Santoso, *Dynamic models for wind turbines and wind power plants*: National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [13] L. H. Hansen, P. H. Madsen, F. Blaabjerg, H. Christensen, U. Lindhard, and K. Eskildsen, "Generators and power electronics technology for wind turbines," in *Industrial Electronics Society, 2001. IECON'01. The 27th Annual Conference of the IEEE*, 2001, pp. 2000-2005.
- [14] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 2369-2385, 2007.
- [15] E. Muljadi and A. Ellis, "Validation of wind power plant models," in *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-7.
- [16] M. Behnke, A. Ellis, Y. Kazachkov, T. McCoy, E. Muljadi, W. Price, and J. Sanchez-Gasca, *Development and validation of WECC variable speed wind turbine dynamic models for grid integration studies*: National Renewable Energy Laboratory, 2007.

- [17] S. R. Guda, "Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation system," Montana State University-Bozeman, College of Engineering, 2005.
- [18] J. G. Slootweg, *Wind power: Modelling and impact on power system dynamics*: TU Delft, Delft University of Technology, 2003.
- [19] H. Faïda, J. Saadi, M. Khaïder, S. El Alami, and M. Monkade, "Etude et analyse des données du vent en vue de dimensionner un système de production d'énergie éolienne Cas d'un site au nord du Maroc," *Revue des énergies renouvelables*, vol. 13, pp. 477-483, 2010.
- [20] Y. Sanghai, "Techno-Economic Analysis of Hydrogen Fuel Cell Systems Used as an Electricity Storage Technology in a Wind Farm with Large Amounts of Intermittent Energy," 2013.
- [21] Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, and X. C. Adroher, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 981-1007, 2011.
- [22] A. Payman, "Contribution à la Gestion de l'Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges," *PhDthesis, Polytechnic Institute of Lorraine, Nancy, France*, 2009.
- [23] K. Kordesch, V. Hacker, J. Gsellmann, M. Cifrain, G. Faleschini, P. Enzinger, R. Fankhauser, M. Ortner, M. Muhr, and R. R. Aronson, "Alkaline fuel cells applications," *Journal of Power Sources*, vol. 86, pp. 162-165, 2000.
- [24] W. Krewitt and S. Schmid, "D1. 1 fuel cell technologies and hydrogen production/distribution options," *CASCADE Mints WP*, vol. 1, 2005.
- [25] L. Hedström, "Fuel cells and biogas," 2010.
- [26] P. L. e. A. Varoquaux, "Les piles haute température SOFC état de l'art et perspectives," *CLEFS CEA* vol. N° 44, 2001.
- [27] J. Amphlett, R. Mann, B. Peppley, P. Roberge, and A. Rodrigues, "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 61, pp. 183-188, 1996.
- [28] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, and P. R. Roberge, "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 86, pp. 173-180, 2000.
- [29] J. Larminie, A. Dicks, and M. S. McDonald, *Fuel cell systems explained* vol. 2: Wiley New York, 2003.
- [30] J. Amphlett, R. Baumert, R. Mann, B. Peppley, P. Roberge, and A. Rodrigues, "Parametric modelling of the performance of a 5-kW proton-exchange membrane fuel cell stack," *Journal of Power Sources*, vol. 49, pp. 349-356, 1994.
- [31] J. Kim, S. M. Lee, S. Srinivasan, and C. E. Chamberlin, "Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 142, pp. 2670-2674, 1995.
- [32] N. Achaïbou, M. Haddadi, and A. Malek, "Modeling of lead acid batteries in PV systems," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 538-544, 2012.
- [33] N. Achaïbou, M. Haddadi, and A. Malek, "Lead acid batteries simulation including experimental validation," *Journal of Power Sources*, vol. 185, pp. 1484-1491, 2008.

- 
- [34] D. Linden and T. B. Reddy, "Handbook of batteries," ed: McGraw-Hill Companies, Inc., New York 2002, (1.3-1.17, 7.10-7.11, 22.12-22.13), 1865.
- [35] T. D. J. ESNAULT, "Pré Projet d'étude et réalisation : Chargeur de Batterie au plomb 48V," 2006.
- [36] K. Young, C. Wang, L. Y. Wang, and K. Strunz, "Electric vehicle battery technologies," in *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, ed: Springer, 2013, pp. 15-56.
- [37] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur," École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
- [38] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*: CRC press, 2009.
- [39] J. Lachaize, "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction," 2004.
- [40] F. Belhachemi, "Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance," Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2001.
- [41] N. Rizoug, "Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation: Application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance," Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2006.
- [42] V. Hermann, A. Schneuwly, and R. Gallay, "High performance double-layer capacitor for power electronic applications," in *proc. PCIM*, 2001, pp. 86-93.
- [43] J. C. Lassègues, "Supercondensateurs," *Laboratoire de physico-chimie moléculaire de l'université de Bordeaux I (France)*, vol. D3 334.
- [44] B. Conway, V. Birss, and J. Wojtowicz, "The role and utilization of pseudocapacitance for energy storage by supercapacitors," *Journal of Power Sources*, vol. 66, pp. 1-14, 1997.
- [45] G. Guidi, "Energy management systems on board of electric vehicles, based on power electronics," 2009.
- [46] A. Schneuwly, B. Maher, and J. Auer, "Ultracapacitors, the new thinking in the automotive world," *Maxwell Technologies Inc*, 2004.
- [47] M. Embrandiri, "Implementation and in-depth analyses of a battery-supercapacitor powered electric vehicle (E-Kancil)," University of Nottingham, 2014.
- [48] M.-Y. Ayad, "Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues," Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2004.
- [49] S. Balani, "Smart Grid Technologies for Efficiency Improvement of Integrated Industrial Electric System," 2011.
- [50] S. C. a. E. P. T. Forum, "Smart Grid's Potential for Clean Energy; Background and Resources," State Climate and Energy Program 2014.
- [51] H. Mohsenian-Rad, "Introduction to Smart Grid," Department of Electrical & Computer Engineering 2012.
- [52] S. Blumsack and A. Fernandez, "Ready or not, here comes the smart grid!," *Energy*, vol. 37, pp. 61-68, 2012.

- [53] M. Á. López Pérez, "Analysis and Operation of Smart Grids with Electric Vehicles," 2014.
- [54] J. P. Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins, "Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities," *Electric power systems research*, vol. 77, pp. 1189-1203, 2007.
- [55] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 8, pp. 18-28, 2010.
- [56] M. Hashmi, S. Hänninen, and K. Mäki, "Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), 2011 IEEE PES Conference on*, 2011, pp. 1-7.
- [57] Z. Jiang, F. Li, W. Qiao, H. Sun, H. Wan, J. Wang, Y. Xia, Z. Xu, and P. Zhang, "A vision of smart transmission grids," in *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE*, 2009, pp. 1-10.
- [58] M. Cavazzuti, *Optimization Methods: From Theory to Design Scientific and Technological Aspects in Mechanics*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [59] R. Beekers, O. Holland, and J.-L. Deneubourg, "From local actions to global tasks: Stigmergy and collective robotics," in *Artificial life IV*, 1994, p. 189.
- [60] H. Rathore, "Mapping Biological Systems to Network Systems," ed: Springer, 2016.
- [61] M. Perretto and H. S. Lopes, "Reconstruction of phylogenetic trees using the ant colony optimization paradigm," *Genetics and Molecular Research*, vol. 4, pp. 581-589, 2005.
- [62] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 53-66, 1997.
- [63] A. Toumi, A. Taleb-Ahmed, K. Benmahammed, and N. Rechid, "Optimisation par Essaim de Particules: application à la restauration supervisée d'image."
- [64] M. Clerc and P. Siarry, "Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile: la méthode des essaims particulaires," *J3eA*, vol. 3, p. 007, 2004.
- [65] Y. S. Baguda, N. Fisal, R. A. Rashid, S. K. Yusof, S. H. Syed, and D. S. Shuaibu, "Biologically-Inspired Optimal Video Streaming over Unpredictable Wireless Channel," *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol. 5, pp. 15-28, 2012.
- [66] S. Mouassa, "Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique (technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS," Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2012.
- [67] K. M. Passino, "Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control," *Control Systems, IEEE*, vol. 22, pp. 52-67, 2002.
- [68] G. Cormier, *L'algorithme génétique en génie électrique: application à l'ellipsométrie et aux réseaux de Bragg*, 2006.
- [69] J.-M. Alliot and N. Durand, "Algorithmes génétiques," *Centre d'Etudes de la Navigation Aérienne*, 2005.
- [70] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, and K. Kalaitzakis, "Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms," *Solar energy*, vol. 80, pp. 1072-1088, 2006.

- [71] A. Dutton, J. Bleijs, H. Dienhart, M. Falchetta, W. Hug, D. Prischich, and A. Ruddell, "Experience in the design, sizing, economics, and implementation of autonomous wind-powered hydrogen production systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 25, pp. 705-722, 2000.
- [72] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, and Z. Fang, "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm," *Solar energy*, vol. 82, pp. 354-367, 2008.
- [73] M. R. Patel, *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*: CRC press, 2005.
- [74] M. A. Masoum, S. M. M. Badejani, and M. Kalantar, "Optimal placement of hybrid PV-wind systems using genetic algorithm," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010*, 2010, pp. 1-5.
- [75] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, and H. Yang, "Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 380-389, 2010.
- [76] P. S. Moura and A. T. de Almeida, "Multi-objective optimization of a mixed renewable system with demand-side management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1461-1468, 2010.
- [77] S. Hakimi and S. Moghaddas-Tafreshi, "Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1855-1862, 2009.
- [78] Z. W. Geem, "Size optimization for a hybrid photovoltaic–wind energy system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, pp. 448-451, 2012.
- [79] H. Yang, L. Lu, and W. Zhou, "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system," *Solar energy*, vol. 81, pp. 76-84, 2007.
- [80] A. A. Ladjici, "Calcul évolutionnaire, application sur l'optimisation de la planification de la puissance réactive," Ecole nationale supérieure polytechnique, 2005.
- [81] M. Beccali, S. Brunone, M. Cellura, and V. Franzitta, "Energy, economic and environmental analysis on RET-hydrogen systems in residential buildings," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 366-382, 2008.
- [82] B. E. Türkay and A. Y. Telli, "Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 1931-1943, 2011.
- [83] K. van Alphen, W. G. van Sark, and M. P. Hekkert, "Renewable energy technologies in the Maldives—determining the potential," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 1650-1674, 2007.
- [84] G. Dalton, D. Lockington, and T. Baldock, "Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1475-1490, 2008.
- [85] L. W. Mays and Y.-K. Tung, *Hydrosystems engineering and management*: Water Resources Publication, 2002.
- [86] A. Kaabeche, M. Belhamel, and R. Ibtouen, "Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system," *Energy*, vol. 36, pp. 1214-1222, 2011.

- [87] C. Wang and M. H. Nehrir, "Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 957-967, 2008.
- [88] P. Thounthong, "Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs," Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2005.
- [89] A. Zemouri, "ETUDE EXPERIMENTALE D'UN CONVERTISSEUR DC/DC CONTROLER PAR UNE COMMANDE ROBUSTE," UNIVERSITE DE BATNA, 2014.
- [90] Alimentations à découpage issues du secteur. *Licence EEA Module U6 Énergie et convertisseurs d'énergie*.
- [91] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon, "Sur les systèmes non linéaires différentiellement plats," *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 1, Mathématique*, vol. 315, pp. 619-624, 1992.
- [92] F. Rotella and I. Zambettakis, "Commande des systèmes par platitude," *Techniques de l'ingénieur S*, vol. 7450, p. 2007, 2007.
- [93] B. Laroche, P. Martin, and N. Petit, "Commande par platitude. Equations différentielles ordinaires et aux dérivées partielles," 2008.
- [94] P. Thounthong and S. Pierfederici, "A new control law based on the differential flatness principle for multiphase interleaved DC-DC converter," *Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 903-907, 2010.
- [95] F. Anritter and J. Lévine, "Flatness characterization: Two approaches," in *Advances in the Theory of Control, Signals and Systems with Physical Modeling*, ed: Springer, 2011, pp. 127-139.
- [96] M. Zandi, R. G. Ghoachani, M. Phattanasak, J.-P. Martin, B. Nahidmobarakeh, S. Pierfederici, B. Davat, and A. Payman, "Flatness based control of a non-ideal DC/DC boost converter," in *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2011, pp. 1360-1365.
- [97] M. Zandi, A. Payman, J.-P. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, and F. Meibody-Tabar, "Energy management of a fuel cell/supercapacitor/battery power source for electric vehicular applications," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 433-443, 2011.
- [98] A. Payman, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar, "Energy control of supercapacitor/fuel cell hybrid power source," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 1637-1644, 2008.
- [99] P. Thounthong, P. Sethakul, S. Raël, and B. Davat, "Fuel cell current ripple mitigation by interleaved technique for high power applications," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. IEEE*, 2009, pp. 1-8.
- [100] A. S. Ammour, "Contribution à la commande par modes glissants d'ordre fractionnaire," *Universit MOULOUD MAMMERI DE TTZI OUZOU, Facult de Gnie Elctrique et d'informatique, Dpartement Au tomate*, p. 45, 2011.
- [101] R. SAADI, "Convertisseurs Basse Tension (42V, 540V); Application Source Hybride Utilisant Une Pile à Combustible," Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.

*Annexe*

## 1) Carte dSPACE DS1104

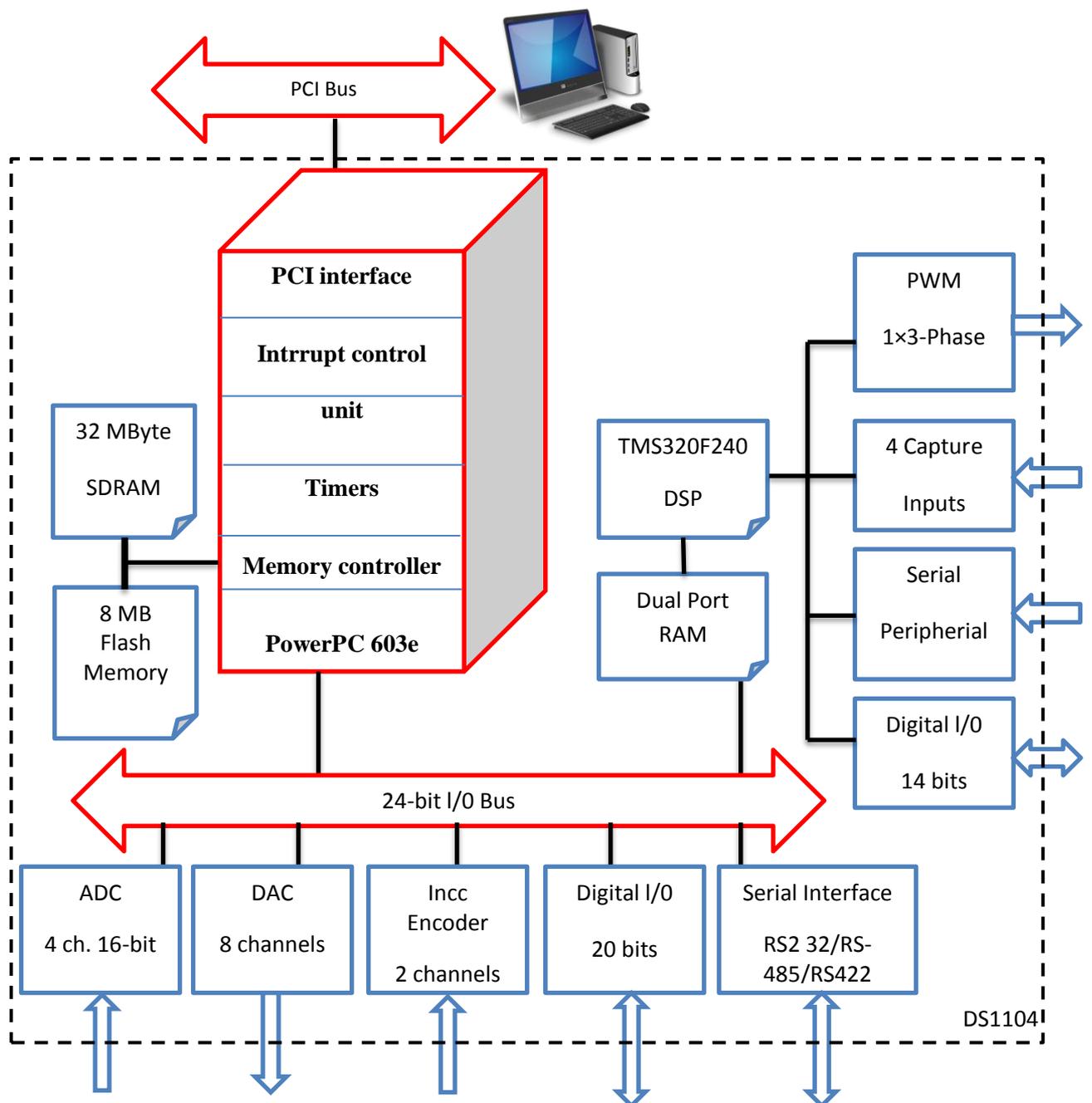


Figure 1- Schéma de la carte Dspace1104

## 2) L'interface de la carte dSPACE 1104



Figure 2 L'interface de la carte dSPACE 1104

## 3) Les capteurs de courant



Figure 3 Capteur de courant.

#### 4) Les Capteurs de tension



Figure 4 Capteur de tension.

#### 5) Carte d'interface

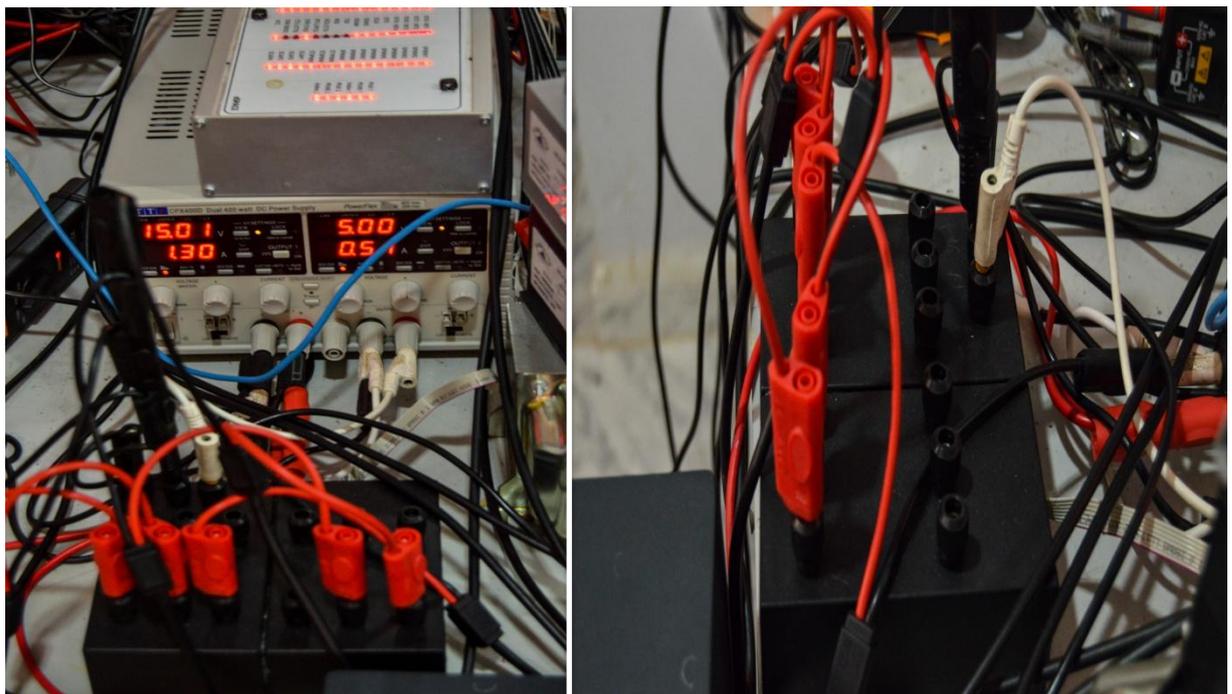


Figure 5 carte d'interface réalisé.

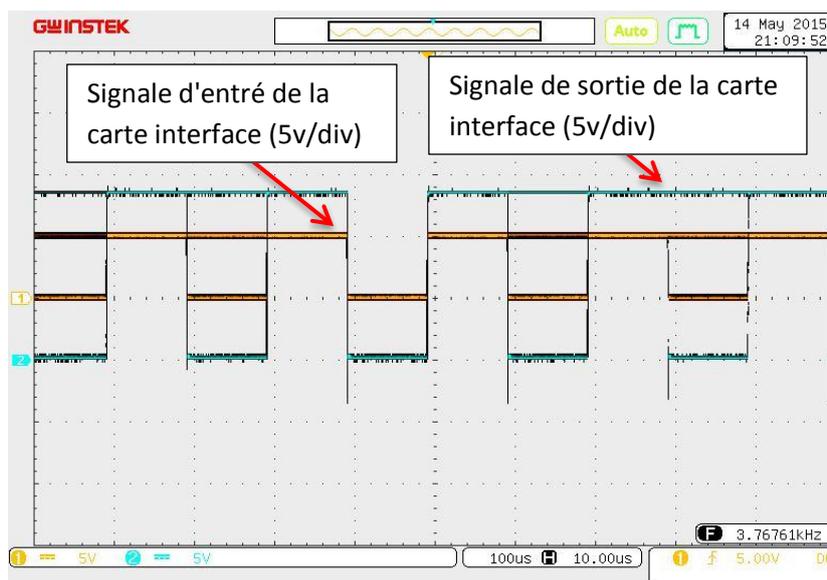


Figure 6 Signaux entré-sortie de la carte interface

## 6) L'émulateur de la pile à combustible

Le stack émulé est un stack PEM Green 500W avec 27 cellules qui est alimenté en air et en hydrogène pur. La tension de sortie typique du stack est de 12 V à 24 V. par ailleurs, le convertisseur « Buck » DC/DC est alimenté par une tension constante de 27 V DC (20A) au cours de nos essais expérimentaux.

Les caractéristiques de notre émulateur sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau 1 Caractéristiques de l'émulateur de stack FC

Paramètres	Valeur
Puissance de la pile	500 (W)
Tension de la pile	27 (V)
Courant de la pile	20 (A)
Tension d'alimentation	27 (V)
Fréquence de découpage	10 (kHz)