

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**Université MSB Jijel**

**Faculté Des Sciences et de la Technologie**

**Département d'Electronique**

**Laboratoire des Energies Renouvelables (LER)**



Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de Doctorat LMD en : Electronique  
Option : Electronique et Analyses des Systèmes

**Par : Imane BENCHABANE**

THÈME

**Elaboration de nouvelles approches pour la commande des  
systèmes électriques intelligents**

Devant le jury composé de :

Président :	Mr. Ammar SOUKKOU	MCA	Université MSB Jijel
Rapporteur :	Mr. Abdelkrim BOUKABOU	Prof	Université MSB Jijel
Examineurs :	Mr. Morad GRIMES	MCA	Université MSB Jijel
	Mr. Yassine HIMEUR	MRA	CDTA Alger
	Mr. Adel OULEFKI	MRA	CDTA Alger

## Résumé

L'augmentation d'utilisation des sources des énergies renouvelables telle que : les énergies solaires, les éoliennes, les pile à combustible et les systèmes de stockage, ont permis de transformer le réseau électrique centralisé vers un réseau décentralisé et intelligent. En outre, les micro-réseaux avec l'interface électronique de puissance sont pris en compte en tant que technologies clés pour faire partie des futurs systèmes de distribution intelligent.

Le contrôle des convertisseurs électroniques de puissance joue un rôle crucial dans les systèmes micro-réseaux en mode connecté au réseau principal et en mode d'îlotage.

Dans le cadre de cette thèse, on a effectué le contrôle de l'interface électronique de puissance d'un système MR de type DC proposé incluant un panneau photovoltaïque, pile à combustible et une batterie de stockage.

Pour améliorer la qualité d'énergie de ce micro-réseau, le contrôle du courant de l'onduleur qui interface ce MR avec le réseau principal était effectué à l'aide de contrôleur PI et la commande à largeur d'impulsion (PI-MLI). Afin d'améliorer les contrôleurs classiques, la commande prédictive (FCS-MPC) était appliquée pour le contrôle du courant de cet onduleur.

L'îlotage est la caractéristique principale des micro-réseaux, dans ce cadre le contrôle de la tension de ce MR en mode îlot était fait à l'aide de la commande prédictive.

Toutefois, l'instabilité demeure un problème majeur dans la conception des systèmes d'alimentation électriques, principalement en raison du comportement non linéaire et chaotique de ces systèmes, dans ce contexte la stabilité et la synchronisation d'un système d'énergie qui a un comportement chaotique et un autre système avec un comportement hyper-chaotique étaient étudiées en utilisant la commande prédictive.

***Mots clés :** réseau électrique intelligent, micro-réseaux, commande des convertisseurs, la commande prédictive, les systèmes d'alimentation chaotiques, contrôle et synchronisation des systèmes d'énergie chaotique.*

## Abstract

The increase in the use of renewable energy sources such as solar energy, wind turbines, Fuel cell, and storage systems has made it possible to transform the centralized electricity into a decentralized and intelligent one.

In addition, microgrids with power electronic interface are considered as the key technologies to be a part of future intelligent distribution systems.

The control of power electronic converters plays a crucial role in microgrid in both grid-connected and islanded mode.

As a part of this thesis, the control of power electronic converter of the proposed DC microgrid including a photovoltaic panel, fuel cell and storage battery has been done.

To improve the power quality of this microgrid, the control of the current for the two-level three-phase inverter that interfaces this microgrid with the main grid was performed using PI controller with pulse width modulation technique (PI-PWM). In order to improve conventional controllers, Predictive control (FCS-MPC) has been applied to control the current of this micro-grid.

The islanding mode is the main characteristic of MG, in this context; the control of the voltage for islanded micro-grid has been done using predictive control.

However, instability remains a major problem in the design of power supply systems, mainly due to the non-linear and chaotic behavior of these systems, in this context the stabilization and synchronization of a resource energy system which has a chaotic behavior and another hyper-chaotic system have been studied using predictive control.

***Key words:*** *Smart grids, microgrids, control of power electronics, predictive control, chaotic power systems, control and synchronization of chaotic systems.*

## ملخص

أدت الزيادة في استخدام مصادر الطاقات المتجددة مثل : الطاقة الشمسية، توربينات الرياح، بطاريات الوقود و أنظمة التخزين إلى تحويل شبكة الكهرباء المركزية إلى شبكة ذكية لا مركزية. بالإضافة إلى ذلك، تعتبر الشبكات الكهربائية الصغيرة الموصولة بالواجهة الإلكترونية من التقنيات الرئيسية لتطوير شبكات التوزيع الذكية.

يلعب التحكم في الواجهة الإلكترونية دورا فعالا في مراقبة أنظمة التوزيع الكهربائي للشبكات الصغيرة الموصولة مع الشبكة الرئيسية وكذا الذاتية التوزيع.

في هذه الأطروحة، قمنا بدراسة التحكم في الواجهة الإلكترونية التي تربط شبكة صغيرة من نوع التيار المستمر، المتكونة من خلية للطاقة الشمسية، خلية وقود و بطارية تخزين.

لتحسين جودة الطاقة في هذه الشبكة الصغيرة، قمنا بإجراء التحكم في التيار الكهربائي للواجهة الإلكترونية التي تربط الشبكة الصغيرة بالشبكة المركزية ذلك باستخدام المراقب (MLI- PI).

من أجل تحسين أنظمة التحكم التقليدية، تم تطبيق طريقة التنبؤ ( FCS-MPC ) لمراقبة التيار الكهربائي.

يعد التوزيع الكهربائي الذاتي الميزة الأساسية للشبكات الصغيرة، في هذا السياق قمنا بدراسة التحكم في فرق الكمون لشبكة صغيرة من نوع التيار المستمر ذات التوزيع الذاتي.

يشكل عدم الاستقرار في توزيع الكهرباء مشكلة رئيسية في أنظمة الطاقة و يرجع ذلك أساسا إلى السلوك الغير خطي و الفوضوي لهذه الأنظمة، و لهذا الغرض قمنا بدراسة استقرار و تزامن نظام طاقوي ذو سلوك فوضوي و نظام آخر ذو سلوك فوضوي شديد باستخدام نظرية التنبؤ.

**الكلمات المفتاحية:** الشبكات الذكية، الشبكات الصغيرة، مراقبة الواجهة الإلكترونية، نظرية التنبؤ، أنظمة الطاقة الفوضوية، مراقبة و تزامن أنظمة الطاقة الفوضوية.

## Remerciement

Je tiens à remercier Monsieur Boukabou Abdelkrim, professeur à l'université Mohammed Seddik Benyahia-Jijel-, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions, qu'il soit aussi remercié par sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour ses encouragements qu'il m'a prodigués.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Josep.M.Guerrero, professeur à l'université d'Aalborg-Danemark-, qui m'a accueilli au sein de son laboratoire de microgrid.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Soukkou Ammar , MCA à l'université Mohammed Seddik Benyahia-jijel- , pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être président de jury.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Grimes Morad, MCA à l'université Mohammed Seddik Benyahia-Jijel-, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être examinateur et membre de jury.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Himeur Yassine et Monsieur Adel Oulefki, MRA à CDTA-Alger-, qui ont bien voulu être examinateurs et membres de jury.

## Dédicaces

Je dédie ce travail,

A mes chers parents,

qui tiennent une place immense dans mon cœur, qui m'ont beaucoup aidé grâce à leur précieux conseils, leurs amours, leurs confiances rassurantes.

A mes frères,

Mohammed Amine, Mahfoud, Islam et Aymen, pour leurs encouragements.

A ma sœur Hiba et son époux Riad.

A tous ceux qui m'aiment.

## Table des matières

<b>Résumé</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Remerciement</b> .....	<b>v</b>
<b>Dédicace</b> .....	<b>vi</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>vii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>xv</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>xix</b>
<b>Liste des acronymes</b> .....	<b>xx</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>I Etat de l’art sur les réseaux électriques intelligents</b> .....	<b>4</b>
<b>1.1 Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>1.2 Les réseaux actuels</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 Vers un réseau moderne</b> .....	<b>5</b>
<b>1.4 Définition d’un réseau intelligent</b> .....	<b>7</b>
<b>1.5 Moyens de réalisation d’un réseau intelligent</b> .....	<b>8</b>
<b>1.5.1 Les compteurs communicants (AMI)</b> .....	<b>8</b>
<b>1.5.2 Réponse à la demande (RD)</b> .....	<b>11</b>
<b>1.5.3 Ressources énergétiques distribuées et stockage de l’énergie</b> .....	<b>12</b>
<b>1.5.4 Application de l’électronique de puissance dans les réseaux électriques intelligents</b> .....	<b>12</b>
<b>1.6 Caractéristique des réseaux intelligents</b> .....	<b>14</b>
<b>1.6.1 Fiabilité</b> .....	<b>14</b>
<b>1.6.2 Flexibilité dans la topologie du réseau</b> .....	<b>15</b>

## Table des matières

1.6.3	Efficacité .....	15
1.6.4	Durabilité .....	15
1.6.5	Convivialité à l'égard de la clientèle .....	16
1.6.6	Réduction des pointes et tarification au moment de l'utilisation .....	16
1.6.7	Chaos .....	16
1.7	Vulnérabilité des réseaux intelligents .....	16
1.8	Conclusion .....	17
<b>II</b>	<b>Généralité sur les micro-réseaux .....</b>	<b>18</b>
2.1	Introduction .....	18
2.2	Concept de micro-réseau et de réseau distribué .....	18
2.3	Avantages et inconvénients des MRs .....	19
2.3.1	Côté technique .....	19
2.3.2	Côté économique .....	19
2.3.3	Côté sociétal .....	20
2.3.3	Côté environnemental .....	20
2.4	Mode d'opération des MRs .....	20
2.4.1	Mode connecté au réseau électrique .....	21
2.4.2	Transition vers le mode autonome .....	21
2.4.3	Mode déconnecté du réseau électrique .....	21
2.4.4	Mode reconnexion au réseau .....	21
2.5	Structure de contrôle des MRs .....	22
2.5.1	Structure de contrôle centralisée .....	22



## Table des matières

2.5.2	Structure de contrôle décentralisée .....	22
2.5.3	Contrôle primaire .....	22
2.5.4	Contrôle secondaire .....	23
2.5.5	Contrôle tertiaire .....	23
2.6	Configuration des systèmes MRs .....	23
2.6.1	Micro-réseau de type DC .....	24
2.6.2	Micro-réseau de type AC .....	25
2.6.3	Micro-réseau hybride .....	26
2.7	Ressources énergétiques distribuées .....	30
2.8	Sources d'énergie non traditionnelles .....	31
2.8.1	Systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité .....	31
2.8.2	Systèmes d'énergie solaire .....	31
2.8.2.1	Générateur photovoltaïque .....	31
2.8.2.2	Panneaux photovoltaïques .....	32
2.8.2.3	Les différents types de panneau solaire .....	33
2.8.2.4	Configuration de système photovoltaïque .....	34
2.8.2.5	Avantages et inconvénients du générateur photovoltaïque .....	35
2.8.3	Système de conversion d'énergie éolienne .....	36
2.8.3.1	Avantages et inconvénients des éoliennes .....	36
2.8.4	Systèmes de production d'énergie à piles à combustible .....	38
2.8.4.1	Avantages et inconvénients des piles à combustible .....	41
2.8.5	Système de stockage d'énergie .....	41
2.8.5.1	Volant d'inertie .....	42

## Table des matières

2.8.5.2	Super-condensateur .....	42
2.8.5.3	Batteries .....	42
2.9	Convertisseurs d'interface des micro-réseaux .....	44
2.9.1	Convertisseurs DC- DC .....	45
2.9.1.1	Convertisseur buck ( dévolteur) .....	45
2.9.1.2	Convertisseur boost (survolteur) .....	47
2.9.1.3	Convertisseur dévolteur – survolteur (Buck-Boost) .....	48
2.9.1.4	Convertisseur DC/DC bidirectionnel .....	50
2.9.2	Convertisseur DC/AC .....	52
2.10	Conclusion .....	53
<b>III</b>	<b>Contrôle des micro-réseaux .....</b>	<b>54</b>
3.1	Introduction .....	54
3.2	Intégration de sources multiples (système hybride) .....	54
3.3	Modélisation et description du système .....	57
3.3.1	Modèle de système photovoltaïque .....	57
3.3.1.1	Commande de système PV .....	60
3.3.1.2	La méthode de la conductance incrémentale .....	62
3.3.1.3	Résultats de simulation .....	65
3.3.2	Modélisation et contrôle de la pile à combustible PEM .....	66
3.3.3	Batterie de stockage .....	70
3.3.4	Principe de la commande MLI pour les convertisseurs DC/DC .....	72
3.3.5	Contrôle de l'onduleur raccordé au réseau .....	74
3.3.6	Contrôle de l'état de charge de Li-Ion batterie .....	74

## Table des matières

3.3.6.1	Principe de la méthode Coulomb counting .....	74
3.3.7	Analyse et résultats de simulation .....	75
3.4	Conclusion .....	79
<b>IV</b>	<b>Commande prédictive .....</b>	<b>80</b>
4.1	Introduction .....	80
4.2	Théorie de la commande prédictive .....	80
4.2.1	Problème de régulation .....	81
4.2.2	Principe de la commande .....	82
4.2.2.1	Modèle dynamique interne .....	82
4.2.2.2	Contraintes .....	84
4.2.2.3	Fonction coût .....	85
4.2.2.4	Phase d'optimisation .....	85
4.2.2.5	Horizon de recul .....	85
4.2.2.6	Défis de la commande prédictive .....	86
4.3	La commande prédictive pour les systèmes électroniques de puissance .....	87
4.3.1	Principe fondamental .....	90
4.3.2	Conception du contrôleur .....	90
4.4	Contrôle de convertisseur DC/AC interface the DC MR .....	90
4.4.1	Principe de la commande FCS-MPC .....	91
4.4.2	Contrôle prédictif de l'onduleur DC/AC en mode connecté au réseau .....	92
4.4.3	Modèle de convertisseur .....	94
4.4.4	Equations de VSI .....	98

## Table des matières

4.4.5	Discrétisation de modèle de prédiction .....	100
4.4.6	Conception de la commande FCS-MPC .....	101
4.4.7	Résultats de simulation .....	101
4.5	Contrôle de la tension en mode d'îlotage .....	104
4.5.1	Problèmes avec les MRs en mode d'îlotage .....	105
4.5.2	Contrôle de la fréquence et de la tension .....	105
4.5.3	Equilibre entre l'offre et la demande .....	106
4.5.4	Qualité de l'énergie .....	106
4.5.5	Enjeux des GDs .....	106
4.5.6	Communication entre les composants du MR .....	107
4.5.7	Îlotage en MR .....	107
4.5.8	Transition entre le mode connecté au réseau et le mode îlot .....	107
4.5.9	Fonctionnement de MR en mode d'îlotage .....	107
4.5.10	Contrôle de MR en mode d'îlotage .....	107
4.5.11	Contrôle d'onduleur de source de tension .....	108
4.6	Description du système .....	109
4.7	Modélisation et discrétisation de VSI .....	110
4.7.1	Filtre LC .....	111
4.7.2	Conception de l'algorithme FCS-MPC .....	113
4.7.3	La fonction cout (FC) .....	113
4.7.4	Résultats et discussions .....	114
4.8	Comparaison entre la commande FCS-MPC et les commandes classiques .....	117

## Table des matières

<b>4.9 Conclusion</b> .....	<b>119</b>
<b>V Contrôle et synchronisation d'un système d'énergie chaotique</b> .....	<b>120</b>
<b>5.1 Introduction</b> .....	<b>120</b>
<b>5.2 Définitions et propriétés de base</b> .....	<b>120</b>
<b>5.2.1 Systèmes dynamiques</b> .....	<b>120</b>
<b>5.2.2 Systèmes non linéaires</b> .....	<b>121</b>
<b>5.2.3 Systèmes déterministes</b> .....	<b>121</b>
<b>5.3 Caractéristiques principales des systèmes dynamiques non linéaires</b> .....	<b>122</b>
<b>5.3.1 Point fixe ou point d'équilibre</b> .....	<b>122</b>
<b>5.3.2 Solution périodique</b> .....	<b>122</b>
<b>5.3.3 Le chaos</b> .....	<b>123</b>
<b>5.4 Méthodes d'analyse des systèmes non linéaires</b> .....	<b>124</b>
<b>5.5 Exemples des systèmes chaotiques</b> .....	<b>128</b>
<b>5.5.1 Exemple des systèmes discrets</b> .....	<b>128</b>
<b>5.5.2 Le chaos dans les réseaux électriques</b> .....	<b>129</b>
<b>5.6 Contrôle des systèmes chaotiques</b> .....	<b>131</b>
<b>5.6.1 La méthode OGY</b> .....	<b>132</b>
<b>5.6.2 La méthode de Pyragas</b> .....	<b>132</b>
<b>5.6.3 La commande prédictive</b> .....	<b>132</b>
<b>5.6.4 Application</b> .....	<b>134</b>
<b>5.6.4.1 Système d'énergie chaotique</b> .....	<b>134</b>
<b>5.6.4.2 Système d'énergie hyper-chaotique</b> .....	<b>136</b>
<b>5.7 Synchronisation des systèmes chaotiques</b> .....	<b>138</b>
<b>5.7.1 Système d'énergie chaotique</b> .....	<b>139</b>

## Table des matières

<b>5.7.2 Synchronisation prédictive d'un système de ressource énergétique</b>	
<b>hyper chaotique.....</b>	<b>141</b>
<b>5.8 Conclusion .....</b>	<b>144</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>145</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>147</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Architecture de réseau intelligent.....	9
<b>Figure 1.2</b> : Production d'énergie centralisée.....	10
<b>Figure 1.3</b> : Production d'énergie décentralisée.....	10
<b>Figure 2.1</b> : Configuration d'un micro-réseau de type DC.....	28
<b>Figure 2.2</b> : Configuration d'un micro-réseau de type AC.....	29
<b>Figure 2.3</b> : Configuration d'un micro-réseau hybride.....	29
<b>Figure 2.4</b> : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	32
<b>Figure 2.5</b> : Progression de la cellule photovoltaïque.....	33
<b>Figure 2.6</b> : Schéma Fonctionnel de la pile à combustible.....	38
<b>Figure 2.7</b> : Lithium-Ion batterie.....	44
<b>Figure 2.8</b> : Circuit équivalent de convertisseur buck.....	46
<b>Figure 2.9</b> : Circuit équivalent de convertisseur boost.....	48
<b>Figure 2.10</b> : Circuit équivalent de convertisseur Buck- Boost.....	49
<b>Figure 2.11</b> : Circuit équivalent de convertisseur bidirectionnel DC-DC.....	51
<b>Figure 2.12</b> : Circuit équivalent de convertisseur DC/AC.....	53
<b>Figure.3.1</b> : Schéma de configuration de micro-réseau de type DC.....	57
<b>Figure 3.2</b> : Modèle de circuit équivalent d'une cellule PV individuelle.....	59
<b>Figure 3.3</b> : Caractéristique puissance-tension de modèle PV.....	60
<b>Figure 3.4</b> : Caractéristique courant-tension de modèle PV.....	60
<b>Figure 3.5</b> : Principe de la méthode IncCond.....	63
<b>Figure 3.6</b> : Schéma contrôle de convertisseur boost avec MPPT.....	64
<b>Figure 3.7</b> : Organigramme de l'algorithme conductance incrémentale (IncCond).....	65

## Liste des figures

<b>Figure 3.8</b> : Courant à la sortie de convertisseur avec le contrôle IncCond .....	66
<b>Figure 3.9</b> : Tension à la sortie de convertisseur avec le contrôle IncCond.....	66
<b>Figure 3.10</b> : Puissance à la sortie de convertisseur avec le contrôle IncCond.....	66
<b>Figure 3.11.b</b> : Circuit électrique équivalent de la pile à combustible.....	68
<b>Figure 3.11.b</b> : V-I caractéristique de pile à combustible.....	68
<b>Figure 3.12</b> : Pile à combustible avec le convertisseur boost.....	70
<b>Figure 3.13</b> : Caractéristique de la pile à combustible.....	70
<b>Figure 3.14</b> : Circuit équivalent de Li-Ion batterie.....	71
<b>Figure 3.15</b> : Batterie de stockage avec le convertisseur bidirectionnel.....	72
<b>Figure 3.16</b> : Caractéristiques de décharge typiques de la batterie.....	72
<b>Figure 3.17</b> : Boucle fermée de contrôle du courant avec un correcteur PI.....	73
<b>Figure 3.18</b> : Contrôle de tension à double boucle.....	73
<b>Figure 3.19</b> : Schéma fonctionnel de contrôle d'onduleur triphasé.....	75
<b>Figure 3.20</b> : La tension à la liaison de bus DC commun.....	76
<b>Figure 3.21</b> : Le courant à la sortie de l'onduleur.....	77
<b>Figure 3.22</b> : La tension à la sortie de l'onduleur.....	77
<b>Figure 3.23</b> : La tension et le courant à la sortie de l'onduleur.....	77
<b>Figure 3.24</b> : L'état de charge de la batterie.....	78
<b>Figure 3.25</b> : Distorsion harmonique total (THD).....	78
<b>Figure 4.1</b> : Schéma descriptif de la loi de commande prédictive.....	81
<b>Figure 4.2</b> : Principe de la commande MPC.....	86
<b>Figure 4.3</b> : Les différentes classes de la commande prédictive.....	89



## Liste des figures

<b>Figure 4.4</b> : Principe de la commande FCS-MPC.....	92
<b>Figure 4.5</b> : Schéma de configuration de système étudié.....	94
<b>Figure 4.6</b> : Schéma de commande de la commande prédictive.....	95
<b>Figure 4.7</b> : Configurations de charge équivalentes pour différents états de commutation...	96
<b>Figure 4.8</b> : Vecteurs de tension dans le plan complexe.....	98
<b>Figure 4.9</b> : Organigramme de la commande FCS-MPC.....	102
<b>Figure 4.10.a</b> : Courant de charge et sa référence.....	103
<b>Figure 4.10.b</b> : Courant de charge et sa référence en $\alpha\beta$ .....	103
<b>Figure 4.10.c</b> : Courant de charge et la tension de sortie.....	104
<b>Figure 4.11</b> : Distorsion harmonique totale du courant.....	104
<b>Figure 4.12</b> : Schéma de système en mode d'ilotage .....	110
<b>Figure 4.13</b> : Schéma fonctionnel de la commande FCS-MPC.....	112
<b>Figure 4.14.a</b> : Tension de sortie et sa référence.....	115
<b>Figure 4.14.b</b> : Tension de sortie de l'onduleur.....	115
<b>Figure 4.14.c</b> : Courant de la charge.....	116
<b>Figure 4.15</b> : distorsion harmonique.....	116
<b>Figure 5.1</b> : Les différents types d'attracteur dans l'espace des phases.....	127
<b>Figure 5.2</b> : Diagramme de bifurcation.....	128
<b>Figure 5.3</b> : L'exposant de Lyapunov de l'équation logistique.....	129
<b>Figure 5.4</b> : Diagramme de bifurcation de la fonction logistique.....	129
<b>Figure 5.5</b> : Réponses temporelles de système électrique.....	130
<b>Figure 5.6</b> : Les portraits de phase de système.....	131
<b>Figure 5.7</b> : Contrôle prédictif à retour d'état.....	133
<b>Figure.5.8</b> : Les réponses temporelles et les portraits de phases.....	135

## Liste des figures

<b>Figure.5.9</b> : Diagramme de bifurcation du système.....	136
<b>Figure.5.10</b> : Le contrôle prédictif du système.....	136
<b>Figure.5.11</b> : Les états du système hyper-chaotique.....	137
<b>Figure.5.12</b> : Attracteurs chaotiques.....	138
<b>Figure.5.13</b> : Contrôle prédictif de système d'énergie hyper-chaotique.....	138
<b>Figure.5.14</b> : erreur de synchronisation de système d'énergie chaotique .....	142
<b>Figure.5.15</b> : erreur de synchronisation de système d'énergie hyper chaotique.....	144

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1</b> : Caractéristiques de certaines technologies de piles à combustible.....	40
<b>Tableau 3.1</b> : Paramètres du panneau PV (Kyocera KC200GT).....	59
<b>Tableau 3.2</b> : Paramètres de simulations.....	76
<b>Tableau 4.1</b> : Configuration de commutateurs et vecteurs de tension complexes pour VSI.....	99
<b>Tableau 4.2</b> : Paramètres de simulations.....	102
<b>Tableau 4.3</b> : Paramètres de simulations.....	115

## Liste des acronymes

**AMI:** Advanced Metering infrastructure.

**RD:** Réponse à la demande (Demand Response).

**DOE:** Department Of Energy.

**RED:** Ressource énergétiques distribuées.

**MR:** Micro-réseau.

**RI:** Réseau intelligent.

**VSI:** Voltage source inverter (Onduleur source de tension).

**DC:** Courant continu.

**AC:** Courant alternatif.

**DC-to-AC:** Courant continu vers un courant alternatif.

**EPS:** Electric Power System.

**SER:** Sources d'énergie renouvelables.

**EP:** électronique de puissance.

**IGBT:** Insulated gate bipolar transistor.

**(IncCond):** Incremental Conductance Algorithm.

**GDS:** générateurs distribués.

**Pile à combustible à membrane échangeuse de protons:** (PEMFC).

**S:** Switch/Commutateur.

**D:** Diode.

**MLI:** Modulation à largeur d'impulsion.

**FC:** Fuel cell.

**SOC:** State-of-charge.

## Liste des acronymes

**MPC:** Commande prédictive.

**FCS-MPC:** Contrôle prédictif par modèle à ensemble fini.

**FC:** Fonction coût.

## Introduction générale

Les réseaux électriques fournissent de l'électricité à 85% de la population mondiale, sont sans doute l'une des réalisations techniques les plus importantes du XXe siècle. Les réseaux traditionnels ont été construits pour accueillir des génératrices centralisées, le transport unidirectionnel de l'électricité par des lignes de transport à haute tension, et la distribution à basse tension avec des centres de contrôle qui recueillent l'information d'un nombre limité de centre de réseau appelé poste secondaire.

En raison de l'augmentation de la demande mondiale d'énergie et du besoin de formes d'énergie alternatives et durable, ainsi que la nécessité de diminuer les émissions de gaz à effet de serre pour réserver la planète, les centrales électriques basées sur les sources d'énergie renouvelables (SER) ont de plus en plus pénétré dans les réseaux électriques modernes.

Les Micro-réseaux (MRs) représentent un nouveau paradigme des réseaux électriques avec des unités de production distribuées qui sont généralement composés des SER, de systèmes de stockages, des charges locales avec une gestion de mesure et de contrôle. Ils sont considérés comme l'une des solutions prometteuses pour construire les réseaux intelligents; afin d'aider à équilibrer la puissance du réseau par une gestion avancée de l'énergie, ainsi de réduire le coût et améliorer la qualité d'énergie.

Par ailleurs, les convertisseurs électroniques de puissance jouent un rôle crucial dans les applications des MRs et des réseaux intelligents (RIs) qui nécessitent un contrôle flexible et rapide de puissance, ainsi qu'une régulation rigide de la tension et/ou du courant à l'endroit où ils ont installés.

L'objectif de cette thèse est de proposer un micro-réseau de type DC incluant différentes sources d'énergies renouvelables, dont le contrôle de l'interface électronique de puissance est important.

Le contrôle d'onduleur de source de tension a un effet majeur pour l'adaptation des micro-réseaux, pour cela des différentes méthodes ont été proposées. Dans notre thèse on a appliqué une commande classique basée sur le contrôleur PI avec la commande modulation à largeur d'impulsion (PI-MLI) pour la régulation du courant de VSI. De plus la commande FCS-MPC qui est considéré comme une méthode récente dans les applications de l'électronique de puissance était ainsi appliquée pour le contrôle de ce dernier en la comparant avec la commande PI.

## Introduction générale

D'autre avantage des MRs est la capacité de fonctionner en mode d'îlotage, en fin la régulation de la tension dans ce mode était effectuée par la commande prédictive.

L'intégration à grande échelle du réseau électrique a apporté une grande commodité pour la production et la consommation d'électricité; cette innovation permet également de stabiliser les réseaux électriques qui présentent des oscillations électromécaniques irrégulières, ces oscillations rendront le système instable avec un comportement chaotique. Il est donc nécessaire d'analyser le mécanisme d'oscillation chaotique des systèmes d'alimentation électrique et d'examiner les méthodes de contrôle, pour cela le contrôle et la synchronisation d'un système d'énergie chaotique et un autre système hyper chaotique était fait à l'aide de la commande prédictive.

### Structure de la thèse

Cette thèse est organisée en cinq chapitres :

- Le premier chapitre représente un état de l'art des réseaux intelligents ; dont les nouveaux récepteurs du réseau de distribution à savoir : les générateurs décentralisés d'énergie, les compteurs communicants, les caractéristiques des réseaux intelligents sont également présentées. En fin la complexité et la vulnérabilité avec ses méthodes d'analyses ont été aussi présentées.
- Le deuxième chapitre est consacré à la définition des MRs, leurs structures et leurs différentes topologies. Les différentes topologies des convertisseurs de l'électronique de puissance sont aussi illustrées.
- Le troisième chapitre aborde les techniques de contrôle des systèmes MRs avec l'interface électronique de puissance. Un MR de type DC avec des sources des énergies renouvelables incluant une source photovoltaïque, pile à combustible et une batterie de stockage était étudié. Le contrôleur PI avec modulation de largeur d'impulsion (PI-MLI) est appliqué pour la régulation du courant de l'onduleur.
- Dans le quatrième chapitre, on développe une commande prédictive (FCS-MPC) pour le contrôle de l'onduleur DC/AC qui interface le MR en mode connecté au réseau. La régulation de la tension de ce MR en mode d'îlotage est réalisée par l'application de la commande FCS-MPC. L'efficacité de cette méthode est montrée par une comparaison à des commandes classiques.

## Introduction générale

- Dans le dernier chapitre, on aborde le contrôle des réseaux électriques avec un comportement chaotique. De plus, la synchronisation de deux systèmes identiques chaotiques et hyper-chaotiques est abordée à base de la commande prédictive.

En fin, cette thèse est clôturée par une conclusion générale.



## 1.1 Introduction

L'énergie est la base de la survie humaine et du développement de la société. L'utilisation rationnelle de l'électricité est synonyme d'une lumière dans la nuit, apportant une grande commodité à l'humanité. Cependant, les énergies fossiles conventionnelles (comme le charbon et le pétrole), qui constituent le moteur de la production d'électricité, s'accroissent progressivement dans le monde entier. Au XXe siècle, l'industrie de l'électricité est confrontée à d'énormes défis. Afin de répondre aux nombreux besoins de développement économique et social et d'améliorer le système électrique existant, elle fait face à des transformations aux réseaux électriques conventionnels avec la mise en œuvre des réseaux intelligents. Ce nouveau paradigme de réseau a vu le jour pour construire un système d'énergie électrique flexible qui coordonne mieux les ressources et les charges énergétiques.

Dans le cadre des réseaux intelligents, les micro-réseaux (MRs) ont été développés ces dernières années pour exploiter pleinement des avantages de l'intégration des ressources énergétiques distribuées, en particulier la production d'énergie renouvelable distribuée basée sur des sources variables et intermittentes, comme l'énergie éolienne et solaire. Néanmoins, pour atteindre tous ces objectifs, il faut une mise en œuvre des technologies innovantes de stockage d'énergie intégrées à des systèmes électroniques de conditionnement d'énergie à haut rendement et à réponse très rapide pour l'interface avec le réseau électrique. Les systèmes électroniques de puissance jouent un rôle clé dans la régulation de l'énergie brute provenant des systèmes de stockage d'énergie et la connexion au réseau électrique. Dans ce chapitre on a abordé l'état de l'art sur les systèmes électriques intelligents.

## 1.2 Les réseaux actuels

En tant que vaste réseau responsable de nombreuses infrastructures essentielles, dont les énergies, les communications, les transports, l'eau et l'approvisionnement alimentaire, il n'est pas surprenant que le réseau, tel qu'il existe aujourd'hui, soit si vital et pourtant si vulnérable. De nombreux composants du réseau sont sensibles aux catastrophes naturelles et anthropiques.

Le réseau de transport constitue à lui seul une source de préoccupation, car plus de 150 000 milles de ces réseaux s'étendent sans protection à travers des paysages ruraux [1]. Les réseaux actuels soutiennent la production, le transport, la distribution et le contrôle de l'électricité ;

## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

cependant, il existe plusieurs moyens d'y parvenir comme nous le verrons plus loin. L'électricité est produite à partir de diverses formes d'énergie, que ce soit le charbon, le gaz naturel ou le nucléaire ; après sa production, l'électricité est portée à une tension plus élevée, ou elle est transmise sur des distances relativement longues. Une fois transmise, elle arrive à un poste où elle est abaissée en tension, puis distribuée dans le réseau de distribution ; certains niveaux de tension de distribution courants sont 34.5kV, 23.9kV, 14.4kV, 13.2kV, 12.47kV, et 4.16kV. Enfin, l'électricité est ramenée de nouveau la tension de distribution à la tension de service nécessaire.

La structure actuelle de la plupart des réseaux de distribution est radiale, dans cette topologie, la puissance est transférée dans une seule direction d'une source particulière à divers points de livraison. Bien qu'il s'agisse de la topologie la moins chère et la plus simple, son inconvénient est qu'une perturbation ou une panne en tout point du réseau affecte tous les clients en aval.

Une autre caractéristique du réseau est que la production et la consommation d'électricité doivent être équilibrées, car l'électricité est consommée presque instantanément après sa production. L'inconvénient est qu'en cas de panne importante non compensée du réseau, l'électricité fournie par les producteurs est réacheminée sur les lignes de transport qui n'ont pas la capacité d'entretenir l'électricité excédentaire, ce qui entraîne une nouvelle panne. Un autre inconvénient de l'interdépendance entre la production et la consommation est que tout surplus d'énergie serait gaspillé s'il n'était pas consommé presque immédiatement.

L'introduction de nouvelles technologies telles que les sources d'énergie renouvelables, les véhicules électriques rechargeables et le stockage d'énergie remodèle le réseau traditionnel, ainsi que la manière, le moment et le lieu où l'électricité est fournie. Un réseau modernisé est non seulement souhaitable, mais aussi nécessaire, car le réseau actuel devient de moins en moins fiable au cours des dernières années.

### **1.3 Vers un réseau moderne**

Compte tenu du fait que les moyens actuels de production et de consommation d'énergie ne suffisent pas pour longtemps, il est conseillé d'apporter certaines améliorations afin de répondre aux besoins de la société. La demande croissante d'électricité est faisant pour développer un réseau plus stable.

## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

Plusieurs objectifs ont été institués pour un réseau avancé du 21<sup>ème</sup> siècle. En particulier, un réseau moderne sera plus sûr, plus fiable, plus économique, plus efficace et plus respectueux à l'environnement [2].

Le concept d'un réseau intelligent et moderne peut devenir réalité tout en épuisant les systèmes de distribution de la technologie numérique, en permettant un flux bidirectionnel d'énergie et de données en temps réel, en intégrant les sources d'énergie renouvelables et les dispositifs de stockage d'énergie, en augmentant la production distribuée et en renforçant la gestion de l'énergie contrôlée par les utilisateurs.

Une caractéristique souhaitable d'un réseau intelligent est la capacité des consommateurs de retourner l'excédent d'électricité au réseau. Pour ce faire, les sources d'énergie renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne doivent être intégrées aux systèmes de distributions, où les propriétaires de maisons ou d'entreprises cherchent à gérer activement leur consommation en se basant sur des informations en temps réel concernant la consommation d'énergie. Toutefois, il est important de tenir compte du fait que les sources d'énergie solaire et éolienne sont des sources d'énergie variables, qui peuvent être disponibles lorsqu'elles ne sont pas nécessaires ou inversement. Pour surmonter cette variabilité de l'offre, des technologies de stockages d'énergie devraient être utilisées pour rendre le système plus prévisible et permettre une utilisation plus efficace des ressources ; en outre le stockage d'énergie est également propice au maintien de l'équilibre entre la production et la consommation.

Comme mentionné précédemment, l'équilibre entre la production et la consommation doit être maintenu si l'on veut que le système électrique reste stable. Si cet équilibre est perturbé la dynamique des générateurs et des charges peut faire varier la fréquence et/ou la tension du système, ce qui entraîne l'effondrement du système [3]. Ainsi que le stockage d'énergie offre une flexibilité supplémentaire bienvenue dans un système où la variabilité n'est pas seulement évidente dans le profil de charge, mais aussi du côté de l'offre. De plus, à mesure que l'adoption des véhicules électriques rechargeables se généralisera, leurs batteries seront probablement considérées comme un stockage mobile distribué, ce qui fera un élément important d'un réseau de distribution modernisé. Ces véhicules présentent également l'avantage de réduire la charge imposée au réseau, car les consommateurs seront encouragés à recharger leurs véhicules la nuit, c.-à-d. en dehors des heures de pointe, et de réacheminer en suite l'électricité vers le réseau

## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

pendant la journée lorsque les véhicules sont stationnés à la maison ou au travail. L'intégration de ces technologies modifiera sans aucun doute la conception conventionnelle de réseau [4].

Un réseau intelligent offre la possibilité d'être plus efficace et plus économique en réduisant au minimum le temps de réponse de l'exploitation du réseau. L'une des façons dont un réseau intelligent favorise l'efficacité est par l'intermédiaire de son réseau de compteurs intelligents et des commandes qui sont largement installés dans le réseau, ce qui permet le relais constant de l'information et permet ainsi aux opérateurs d'être au courant de l'état du réseau ; où les retards souvent du fait que les consommateurs doivent appeler les opérateurs pour les informer de l'existence d'une source d'énergie en panne. L'efficacité inhérente à ces retards représente une perte du temps et une productivité précieuse.

Les compteurs et les commandes intelligents, ainsi que la topologie du réseau maillé, peuvent permettre au réseau de prendre des décisions automatisées et auto-réparatrices.

### 1.4 Définition d'un réseau intelligent

La définition et la description du réseau intelligent ne sont pas uniques, car sa version pour les parties prenantes et les complexités technologiques peuvent être différentes :

Par exemple, l'Ontario Smart Grid Forum a défini le réseau intelligent comme suit :

" Un réseau intelligent est un système électrique moderne, il utilise les moyens de communications, les capteurs, l'automatisation et les ordinateurs pour améliorer la souplesse, la sécurité, la fiabilité, l'efficacité et la sûreté du réseau électrique. Il offre aux consommateurs un plus grand choix en leur permettant de contrôler leur consommation d'électricité et de réagir aux changements de prix de l'électricité en ajustant leur consommation. Un réseau intelligent comprend des sources énergétiques diverses et dispersées, il permet la recharge des véhicules électriques, facilite la connexion et le fonctionnement intégré. En bref, il rapproche tous les éléments de la production, de la fourniture et de la consommation d'électricité afin d'améliorer le fonctionnement global du système dans l'intérêt des consommateurs et de l'environnement " [5].

Alors que, le département de l'énergie des Etats-Unis (DOE) a proposé la définition suivante du réseau intelligent :

## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

" Réseau de distribution d'énergie automatisé et largement réparti, le réseau intelligent sera caractérisé par un flux bidirectionnel d'électricité et d'information et sera capable de tout surveiller, des centrales électriques aux préférences des clients et aux appareils individuels, il intègre dans le réseau les avantages de l'information et des communications distribuées pour fournir des informations en temps réel et permettre l'équilibre quasi instantané de l'offre et de la demande au niveau des appareils. En se basant sur les thèmes communs (qui sont : la communication, l'intégration et l'automatisation durable, économique et sécuritaires [1]). La figure 1.1 montre une topologie typique de réseau intelligent.

Avec le réseau intelligent de transport et de régulation de l'énergie électrique, on passe de la notion de centrale à celle de dé-centrale. En effet les grosses centrales de production, qu'elles soient nucléaire, au fioul, au charbon ou même hydroélectrique, nécessitent le transport de l'électricité sur de longues distances, ce qui conduit à des pertes importantes et à une diminution du rendement de la production d'énergie. En revanche, la notion de dé-centrales permet, selon les conditions locales, les capacités de stockage, en fonction de l'utilisation le jour, la nuit, en période de pic de demande, de s'adapter en continu aux usages. On comprend ainsi qu'une approche fondée sur des « dé-centrale » plutôt que sur les grosses centrales avec un réseau de distribution à distance et passif, non seulement peut conduire à des économies importantes d'énergie à des rejets moins polluants, à une sécurité accrue, mais aussi des créations massives d'emplois. Et surtout à la responsabilité des citoyens vis-à-vis de leur avenir énergétique. Les figures ci-après représentent les deux topologies.

### **1.5 Moyens de réalisation d'un réseau intelligent**

D'une manière générale, ils existent des moyens pour la réalisation des systèmes électriques intelligents parmi eux, on peut citer les plus importants :

#### **1.5.1 Les compteurs communicants (AMI)**

L'infrastructure de comptage avancée permet aux services publics de recueillir, de mesurer et d'analyser des données sur la consommation d'énergie à des fins de gestion du réseau, de notifications des pannes et de facturation par consommation bidirectionnelle [6]. Les compteurs intelligents sont destinés à fournir des informations plus détaillées qui permettront au fournisseur d'ajuster le prix de la consommation en fonction de différents paramètres. Les prix de l'électricité

# Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

varient au cours d'une journée ou d'une saison, selon le principe de l'offre et de la demande du marché (notamment avec l'introduction de sources renouvelables et non distribuables) ou en raison de facteurs externes tels que la température.

L'utilisation d'un système à tarifs multiples permettra de tenir compte de ces changements de prix pour le client final et l'incitera ainsi à faire une utilisation plus économique de l'énergie. Ces signaux de tarification doivent contribuer à réduire les pointes de consommation et à vendre plus d'énergie en dehors des heures de pointe, par exemple la nuit.

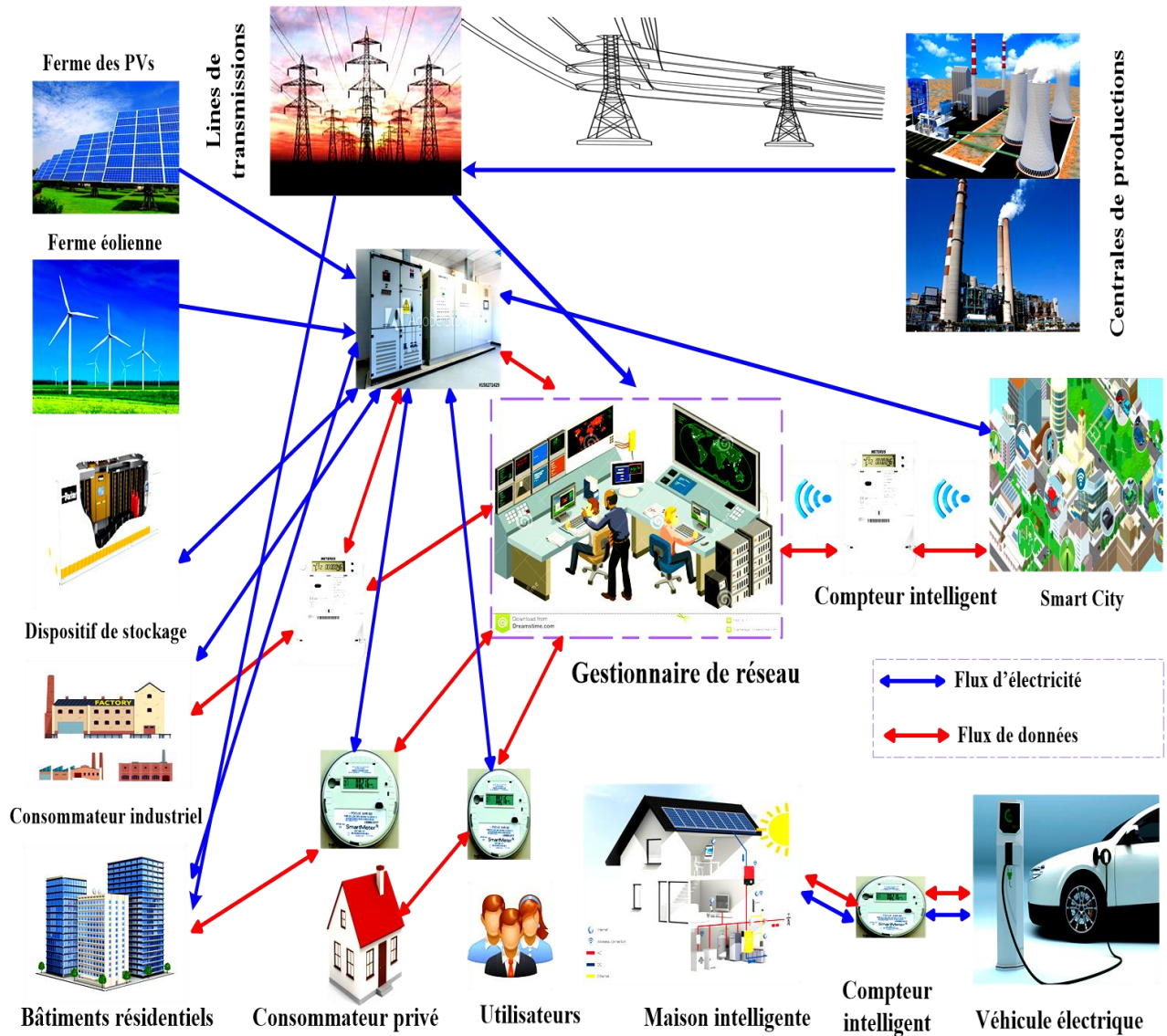


Figure 1.1 : Architecture de réseau électrique intelligent.

# Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

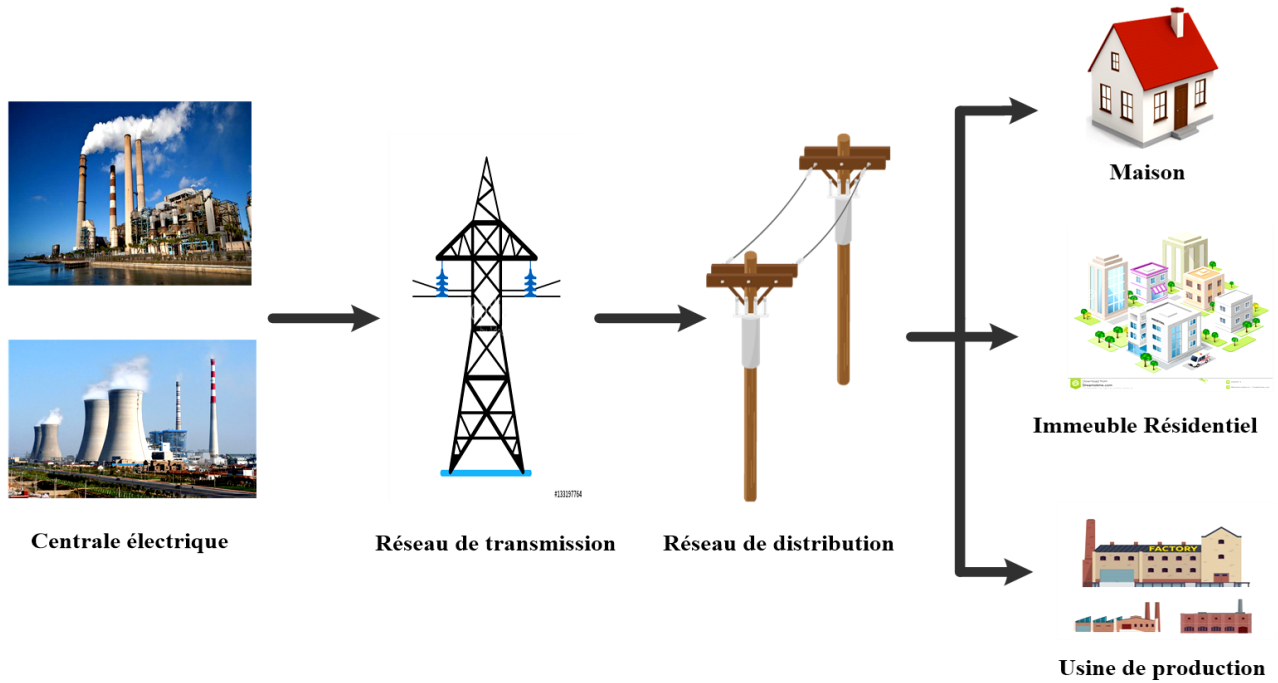


Figure 1.2 : Production d'énergie centralisée.

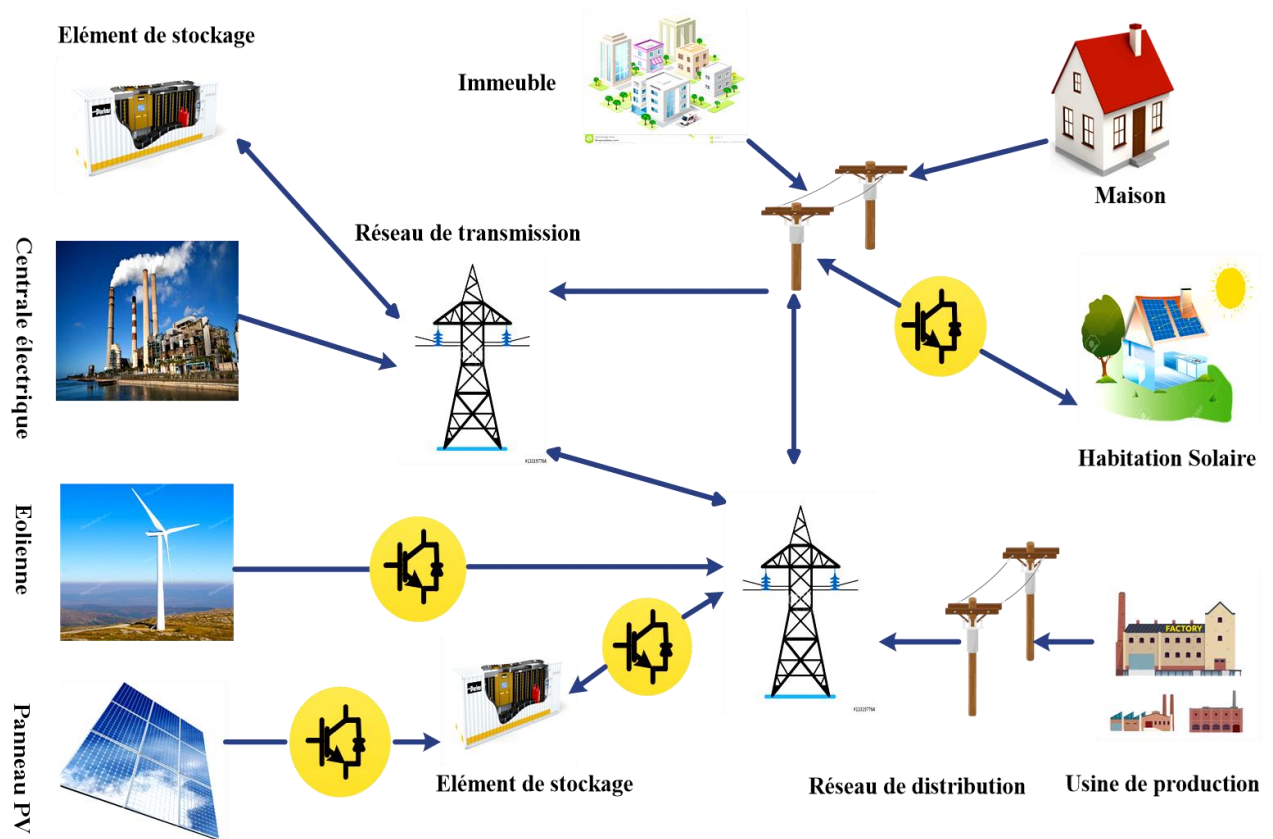


Figure 1.3 : Production d'énergie décentralisée.

## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

### ➤ **Technologies requises pour transmettre l'information recueillie à partir des locaux**

La disponibilité d'une alimentation de secours au compteur ne sera pas critique parce que les services de comptage à domicile ne sont pas nécessaires pendant les pannes. La technologie des lignes électriques porteuses (PLC) est la plus courante dans les régions rurales et à faible densité où la couverture sans fil est moins disponible en raison de leur faible bande passante (souvent inférieure à 20 kbps) et nécessite de contourner cet élément du réseau qui aurait normalement brouillé le signal PLC (comme les transformateurs).

L'acheminement de l'information des points d'agrégation vers le service public fonctionne généralement sur des réseaux privés [7].

- La liaison de retour peut être réalisée à l'aide d'une variété de technologies, telles que les réseaux à fibre optique, ou à micro-ondes. Les réseaux en étoile peuvent également être utilisés pour la transmission des données du concentrateur au service public, en utilisant souvent la connectivité sans fil commerciale.
- De nombreux réseaux AMI n'ont qu'une connectivité intermittente à l'utilitaire car les concentrateurs de données sont utilisés pour collecter les données des différents compteurs intelligents en temps réel et les envoyer à l'utilitaire des entreprises à la fois périodiquement et en temps réel.
- La rétro transmission de données en temps réel ou en temps quasi réel à partir de milliards d'appareils nécessite non seulement une bande passante énorme, mais aussi des capacités de stockage de données bien au-delà de la base installée actuelle.

### **1.5.2 Réponse à la demande (RD)**

La réponse à la demande (RD) peut être définie comme les changements dans l'utilisation de l'électricité par les consommateurs finaux par rapport à leurs habitudes de consommation normales en réponse aux variations du prix de l'électricité de fil du temps, ou aux paiements incitatifs conçus pour inciter les consommateurs à consommer moins d'électricité lorsque les prix sont élevés ou lorsque le réseau est faible. La réponse à la demande est mise en œuvre pour réduire la consommation d'électricité des clients en réponse à l'augmentation de prix d'énergie ou pendant les périodes de pointe de charge. Les exigences en matière de consommation pour la réponse à la demande sont très semblables à celles de l'infrastructure de comptage avancé [8].



## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

Au cours d'un événement RD les utilisateurs détectent l'augmentation de la demande, au lieu d'allumer les générateurs couteux, RD essaie de réduire la demande en diminuant/augmentant la température de climatiseur par exemple ou en réduisant le taux de charge de véhicule électrique ou en communiquant avec l'onduleur pour fournir l'énergie excessive des unités de stockages. La RD peut être mise en œuvre par les services publics, après avoir obtenu l'approbation nécessaire des clients et les services publics paient le client dans les débats.

### **1.5.3 Ressources énergétiques distribuées et stockage de l'énergie**

Les ressources énergétiques distribuées (RED) sont définies comme suit : « les RED sont des sources d'énergies plus petites qui peuvent être regroupées pour fournir l'énergie nécessaire pour répondre à la demande régulière. Au fur et à mesure que le réseau d'électricité continue de se moderniser, les RED ; comme les technologies renouvelables et les dispositifs de stockages peuvent aider à faciliter la transition vers un réseau plus intelligent. La communication pour les RED est la même que celle de l'infrastructure de comptage avancée. Pendant les périodes de charge, les RED peut être utilisées pour alimenter les charges excessives » [9].

Les principales caractéristiques des ressources renouvelables qui influent sur leur intégration aux réseaux électriques sont leurs tailles (capacité de production par rapport à d'autres sources de production d'électricité sur un réseau), leur emplacement (tant sur le plan géographique que par rapport à la topologie du réseau) et leur variabilité.

### **1.5.4 Application de l'électronique de puissance dans les réseaux électriques intelligents**

L'application de la technologie de l'électronique de puissance dans les systèmes d'alimentation s'est développée au cours des dernières décennies. Cela s'explique principalement par les développements dans le domaine des semi-conducteurs. Ainsi, la disponibilité de systèmes de contrôle numérique avec des technologies d'appareils peuvent améliorer les performances de réseau. Par la suite, la technologie de l'électronique de puissance s'est révélée un outil important pour l'évolution récente de la production décentralisée et des énergies renouvelables.

Le contrôle de l'électronique de puissance est très important à l'intégration des énergies renouvelables pour assurer la stabilité de réseau électrique.

Il est bien connu que la tendance de la construction du réseau intelligent est plus fiable, plus sûre et plus efficace. Les progrès de la technologie de l'électronique de puissance constituent une

## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

approche importante dans cet effet. Par conséquent, cette thèse a étudiée l'application de l'électronique de puissance avancée dans les réseaux intelligents dont la demande pour cette technologie et la tendance à la recherche et au développement avancé de l'électronique de puissance ont d'abord été introduites.

### 1.5.4.1 Nécessité de la technologie de l'électronique de puissance aux réseaux intelligents

Le réseau intelligent a cinq exigences en matière de technologie de l'électronique de puissance avancée [10].

- La première exigence, est de renforcer l'optimisation et d'assurer la sécurité du réseau électrique. On sait que la structure du réseau électrique et l'équipement de transport et de distribution devraient être ajustés et améliorés ; dans ce cas le dispositif électronique de puissance avancé est un moyen important pour le contrôle du système, qui peut être utilisé pour ajuster la tendance du réseau de distribution d'électricité, améliorer la structure de la poutelle spatiale, inhiber la propagation de la panne du réseau électrique, et améliorer le réseau sous divers défaut « autoréparation », afin d'améliorer le niveau de fonctionnement et la stabilité du réseau.
- La deuxième exigence est de promouvoir l'utilisation efficace des énergies renouvelables.
- La troisième exigence est d'améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique et le marché de l'électricité. Des statistiques pertinentes montrent que les pertes causées par la qualité de l'énergie électrique s'élèvent à des centaines de milliards de dollars chaque année [11]. Comment améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie devient le problème le plus important. La technologie avancée des dispositifs de l'électronique de puissance peut être utilisée pour améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique et l'efficacité de la distribution du réseau en même temps.
- La quatrième exigence est de garantir la fiabilité des appareils électroniques de puissance. Les inconvénients de la technologie de simulation existante limitent également le développement de la technologie de l'électronique de puissance, par conséquent, l'électronique de puissance doit être établie une plateforme de simulation unifiée pour assurer la fiabilité des dispositifs électroniques de puissance, afin d'améliorer la fiabilité du système électrique.

## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

- La dernière demande est de promouvoir la recherche sur les technologies de conservation de l'énergie et de réduction des émissions de gaz. Aujourd'hui, les pays du monde entier s'intéressent au développement de l'énergie propre, et l'application de la technologie avancée en électronique de puissance au réseau intelligent est le moyen efficace de répondre à cette demande.

### **1.5.4.2 Tendances de la recherche et du développement dans le domaine de la technologie avancée en électronique de puissance**

La voie du développement de la technologie avancée dans l'électronique de puissance au cours des prochaines années a été décrite comme suit :

L'objectif de la technologie de transmission DC est de réaliser l'appareil central du réseau DC. Ainsi de parvenir à un système de transmission à courant continu basé sur le réseau intelligent, qui va jouer un rôle de premier plan dans le domaine de la technologie de transmission en DC. L'objectif de la technologie de la qualité de l'énergie est de résoudre le problème clé du réseau de distribution d'énergie intelligent et de mettre en œuvre un guide de spécification des produits d'énergie personnalisés et le mécanisme de contrainte de normalisation et le système de classification de la qualité de l'énergie [12].

## **1.6 Caractéristiques des réseaux intelligents**

Le réseau intelligent offre une solution complète aux problèmes d'alimentation électrique, ils s'ont avérés être équipés d'un certain nombre de caractéristiques, dont quelques-unes sont mentionnées ci-dessous.

### **1.6.1 Fiabilité**

Le réseau intelligent fait appel à des technologies telles que l'estimation d'état, qui améliore la détection des pannes et permettent l'autoréparation du réseau sans l'intervention de techniciens [13]. Cela garantira un approvisionnement en électricité plus fiable et réduira la vulnérabilité aux catastrophes naturelles ou aux attaques.

### **1.6.2 Flexibilité dans la topologie du réseau**

## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

Les infrastructures de transport et de distribution de la prochaine génération seront mieux à même de gérer le flux d'énergie bidirectionnel, ce qui permettra la production décentralisée; par exemple à partir des panneaux photovoltaïques sur les toits des bâtiments, mais aussi l'utilisation de piles à combustibles, la recharge des batteries des voitures électriques, des éoliennes, des centrales hydroélectriques pompées et d'autres sources.

Les réseaux classiques ont été conçus pour un flux d'électricité à sens unique, mais si un sous-réseau local produit plus d'électricité qu'il n'en pas consomme, le flux inverse peut soulever des problèmes de sécurité et de fiabilité [14].

### **1.6.3 Efficacité**

De nombreuses contributions à l'amélioration globale de l'efficacité de l'infrastructure énergétique sont attendues du déploiement de la technologie des réseaux intelligents, en particulier la propriété de gestion de la demande de la technologie est populaire. De cette façon, la charge diminue sur les canaux de transmission et de distribution. Ce qui se passe en cas d'ajustement de la charge, c'est que lorsque la charge sur les lignes de distribution augmente, le réseau intelligent envoie un avertissement aux canaux qui utilisent l'énergie maximale. C'est un signe qu'il doit passer à des génératrices de secours.

Pour réduire la consommation d'énergie pendant les heures de pointe, on utilise ce qu'on appelle le nivellement de pointe, alors que le prix de l'énergie est augmenté pendant les heures de pointe de la consommation d'énergie et diminué pendant les heures de faible consommation. Les clients sont informés des prix, ils consomment alors moins d'énergie aux heures de pointe et la charge est automatiquement réduite sur les lignes.

### **1.6.4 Durabilité**

La flexibilité accrue du réseau intelligent permet une grande pénétration de source d'énergies renouvelables très variables telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne, même sans ajout de stockage d'énergie.

### **1.6.5 Convivialité à l'égard de la clientèle**

La technologie de réseau intelligent aide à satisfaire à la fois les fournisseurs et les clients. L'augmentation de la stratégie de prix de l'énergie est bénéfique pour les fournisseurs, car la

## Chapitre I. Etat de l'art sur les réseaux électriques intelligents

charge reste moindre pendant les heures de pointe. Il en va de même pour les clients qui doivent alors payer moins pour moins de consommation pendant ces heures.

### **1.6.6 Réduction des pointes et tarification au moment de l'utilisation**

Pour réduire la demande pendant les périodes de pointes à coût élevé, les technologies de communications et de comptage informent les appareils intelligents à la maison et au travail lorsque la demande d'énergie est élevée et font le suivi de la quantité d'électricité du moment où elle est utilisée. Par exemple, un service public pourrait réduire l'utilisation d'un groupe de bornes de charge de véhicules électriques ou modifier les points de consigne de température des climatiseurs dans une ville [15].

### **1.6.7 Chaos**

La mesure dans laquelle l'exposition du système au chaos est liée au niveau d'influence de l'autorité centrale de contrôle. Dans le cas de réseau intelligent, le chaos peut survenir principalement après le processus d'intégration, en raison de l'influence de facteurs non techniques affectant le système qui sont difficiles à prévoir et à contrôler, notamment l'acceptation et la participation sociale. Compte tenu de la nature de ces facteurs, la modélisation de scénarios de comportement chaotique à l'étape de la conception est un problème de prévision complexe de nature multidisciplinaire, puisque, de façon réaliste, les principales interrelations entre les éléments surviennent après la mise en œuvre du système [16].

## **1.7 Vulnérabilité des réseaux intelligents**

La plupart des caractéristiques de complexité des réseaux intelligents sont des sources possibles de Vulnérabilité de cette topologie. Leur classement en fonction de leur impact potentiel sur les ressources et les fonctionnalités les plus précieuses du réseau électrique est un objectif de l'évaluation de la vulnérabilité, car il peut guider l'allocation et la protection lors des phases de conception et d'exploitation. Toutefois, à ce stade de l'élaboration du concept réseau intelligent, le classement des vulnérabilités par l'importance de leur impact attendu serait un exercice abstrait qui ne servirait à rien. Le processus d'ingénierie peut être considéré comme fournissant au concepteur de contrôle total des propriétés topologiques et comportementales d'un réseau intelligent donné.

### **1.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques informations concernant les réseaux électriques intelligents; en particulier les différents éléments essentiels pour réaliser un réseau intelligent ainsi que ces caractéristiques. La comparaison entre la production centralisée et la production décentralisée était effectuée. De plus, nous avons évoqué la vulnérabilité et la complexité des réseaux électriques intelligents. Dans le chapitre suivant, nous présenterons une étude sur les MRs qui sont le cœur des réseaux électriques intelligents avec les différentes ressources d'énergie renouvelables ainsi que les méthodes de contrôle existant dans la littérature.

### 2.1 Introduction

Dans ces dernières années, l'intérêt des sources des énergies renouvelables pour la production d'électricité gagne progressivement de l'importance dans le monde entier en raison de l'épuisement des combustibles fossiles, et donc l'augmentation des coûts ainsi que l'incapacité et l'inefficacité du réseau électrique existant. Par conséquent, il y'a une grande tendance à utiliser des sources des énergies renouvelables pour fournir de l'électricité dans les zones isolées et éloignées. En raison de l'utilisation des ressources naturelles, les besoins en systèmes énergétiques micro-réseaux augmente de plus en plus. De plus un tel système nécessitera des petits accumulateurs d'énergies, de petites et grandes charges et des micros générateurs, ce qui mènera à l'introduction d'une catégorie unique de système de production décentralisée appelée micro-réseau (MR).

La plupart des sources d'énergie distribuées s'interfacent avec le réseau électrique et les charges des clients par l'intermédiaire d'un onduleur de source de tension (Voltage source inverter (VSI)) DC-to-AC (courant continu vers un courant alternatif), qui constitue la principale composante d'interface qui intègre la tension continue de la source d'énergie renouvelable avec les exigences de tension alternative de la charge à la demande et du réseau de distribution. Il est utilisé pour la stabilité du réseau en contrôlant la tension, la fréquence, le courant et la puissance active et réactive [17].

Ce chapitre examinera les définitions et le développement des MRs avec une description détaillée de leurs avantages et inconvénients. Les types et les technologies de production décentralisée, en particulier les générateurs non traditionnels ainsi que les méthodes de contrôle des MRs.

### 2.2 Concept de micro-réseau et de réseau distribué

Les MRs ont été identifiés comme un élément clé du réseau intelligent (Smart-Grid) pour l'amélioration de l'efficacité des réseaux de distribution d'électricité.

Un micro réseau est défini comme un réseau électrique standard à petite échelle, intégrant une gestion intelligente formée par des ressources d'énergie distribuées (RED), telle que (les énergies solaires photovoltaïques, petites éoliennes, pile à combustibles, micro-turbines...etc) et des dispositifs de stockage distribués comme (Batteries, condensateur, super -condensateurs... etc). De plus, il est caractérisé par des charges qui sont électriquement connectées et contrôlées avec

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

fonctionnement en mode connecté au réseau ou comme un réseau en mode isolé [18]; La figure 2.1 Montre la structure d'un MR.

D'autres définitions similaires ont été proposées par des organisations de recherches telles que le Département d'Energie des Etats-Unis (DOE) qui a fourni la définition suivante :

« Le MR est un groupe de charges interconnectées et des ressources énergétiques distribuées à l'intérieur de limites électrique clairement définies qui agit comme une seule entité contrôlable par rapport au réseau. Un MR peut se connecter et se déconnecter du réseau pour lui permettre de fonctionner en mode connecté au réseau ou en mode îlot ». D'autres organisations définissent les MRs avec des définitions très similaires, y compris le concept d'un système de charges et de production multiples et d'îlotage à partir du réseau.

### 2.3 Avantages et inconvénients des MRs

Les bénéfices de déploiement des MRs sont nombreux :

#### 2.3.1 Côté technique

- Permettre la modernisation du réseau et l'intégration de multiples technologies Smart Grid.
- Améliorer l'intégration des sources d'énergie réparties et renouvelables qui aident à réduire la charge de pointe et à réduire les pertes en localisant la production près de la demande.
- Répondre aux besoins des utilisateurs finaux en assurant l'approvisionnement en énergie pour les charges critiques, en contrôlant la puissance, la qualité et la fiabilité au niveau local, et la promotion de la participation des clients par la gestion de la demande et l'implication de la communauté dans l'approvisionnement en électricité.
- Soutenir le macro-réseau en manipulant les charges sensibles et la variabilité des énergies renouvelables au niveau local, et la fourniture de services auxiliaires au réseau de production-transport d'électricité.

#### 2.3.2 Côté économique

En fonction de sa taille, les MRs peuvent être utilisés avec un rôle d'agrégateur, pour s'ajuster sur les marchés (marché d'ajustement et marché de capacités). Les MRs



## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

permettent également de différer des investissements de réseau, la proximité entre production, consommation et d'optimiser l'acheminement de l'énergie. Ils permettent aussi de réduire le volume des pertes techniques.

### 2.3.2 Côté sociétal

Les MRs fournissent des réponses à l'évolution des besoins fondamentaux d'un territoire en énergie. Ils offrent notamment un réseau plus sûr et plus fiable en cas d'incident. Parce qu'il s'agit d'un projet local, il facilite également la création d'initiatives et de nouveaux partenariats entre les acteurs locaux.

### 2.3.3 Côté environnemental

Ils permettent de mieux intégrer les énergies de sources renouvelables sur les réseaux et ainsi d'éviter l'installation des centrales thermiques en zones « fragiles » et diminuer les émissions à effet de serre.

Malgré les avantages cités précédemment, les MRs présentent quelques inconvénients à savoir :

- La tension, la fréquence et la qualité de l'énergie doivent se situer à des limites acceptables.
- Nécessite des réservoirs de batterie pour le stockage, ce qui nécessite de l'espace et de l'entretien.
- La resynchronisation au réseau électrique est difficile.
- La protection est difficile.

## 2.4 Mode d'opération des MRs

Le fonctionnement des MRs peuvent être dépendre des intérêts contradictoires entre les différents acteurs impliqués dans la génération d'électricité, tels que les opérateurs du réseau, les propriétaires des générateurs distribués, les fournisseurs d'énergie... etc. Le fonctionnement optimal des MRs est basé sur les aspects économiques, techniques ou environnementaux. IEEE std.1547.4-2011[19] est répartie le fonctionnement des MRs en quatre modes : le mode connecté, le mode autonome, transition vers le mode autonome et le mode de reconnexion.

### 2.4.1 Mode connecté au réseau électrique

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

Le MR est connecté au réseau principal selon ses besoins d'énergie, il peut recevoir partiellement ou totalement l'énergie ou envoyer le surplus de son énergie électrique au réseau principal lorsque sa production totale dépasse la consommation. Dans ce mode il est conseillé que la mesure, l'échange d'information et le contrôle d'équipement du système autonome soient fonctionnels y compris le système de protection pour fournir les informations du niveau de production, les charges locales et les tensions du système, pour que la transition puisse être planifiée à l'avance.

### **2.4.2 Transition vers le mode autonome**

Il est conseillé que les REDs soient disponibles pour soutenir la tension et la fréquence du système durant un laps du temps pendant que les dispositifs d'interconnexion et de protection prennent le relais pour effectuer une transition réussie.

### **2.4.3 Mode déconnecté du réseau électrique**

Lorsque le réseau électrique en amont rencontre un problème, ou s'il y a des actions prévues (par exemple, afin d'effectuer des opérations de maintenance), le MR peut facilement se déconnecter du réseau principal et rester opérationnel et fonctionnel comme une entité autonome pour alimenter les charges locales. Pour équilibrer la charge et la génération dans le mode autonome, plusieurs techniques sont suggérées dans la littérature telle que le suivi de charge (en anglais load following), la gestion de la charge (en anglais load-management) et le délestage de charge (en anglais load shedding) [20]. En outre, il est souligné que la stabilité transitoire devrait être maintenue pour les variations de la charge, une unité RED en panne, et les défauts en mode autonome. Il est également suggéré que le relais adaptatif peut être mis en œuvre pour assurer une protection adéquate pour une variété de modes de fonctionnement du système.

### **2.4.4 Mode reconnexion au réseau**

Pour la reconnexion du système autonome au système de puissance électrique (en anglais Electric Power System EPS), la surveillance doit indiquer que les conditions appropriées existent pour synchroniser le système autonome au EPS. Il est conseillé qu'après une perturbation dans EPS, aucune reconnexion ne doit avoir lieu jusqu'à ce que la tension de l'EPS soit à l'intérieur de la gamme B de la norme ANSI /NEMA C84.1 -2006 [21]. La gamme de fréquences se situe entre 59,3 Hz à 60,5 Hz. En outre, la tension de phase, et la fréquence entre les deux systèmes devrait

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

être dans des limites acceptables telles que spécifiées dans la norme IEEE Std 1547- 2003 afin d'initier une reconnexion.

### 2.5 Structure de contrôle des MRs

En ce qui concerne l'architecture de contrôle des MRs, ou tout autre problème de contrôle, il y a deux approches différentes qui peuvent être identifiées : le contrôle centralisé et le contrôle décentralisé [22, 23].

#### 2.5.1 Structure de contrôle centralisée

Cette structure exige que les données et les mesures de tous les MRs soient livrées à un contrôleur central qui détermine les actions de contrôle pour le système entier afin de garder un équilibre dans le partage de puissance entre les générateurs. Un contrôle entièrement centralisé repose sur la transmission d'une grande quantité de l'information entre les unités impliquées et la décision est alors prise en un seul point. Elle posera donc un gros problème de mise en œuvre, car les réseaux électriques étendus impliquent un nombre énorme d'unités, ce contrôle est impossible lorsque les générateurs du MR sont répartis sur une vaste zone avec de longues distances entre eux, car si l'opérateur de contrôle échoue à garantir le contrôle à cause d'une quelconque raison, l'ensemble du système peut cesser de fonctionner.

#### 2.5.2 Structure de contrôle décentralisée

Cette structure n'est pas basée sur la communication, car chaque unité est contrôlée par son contrôleur local pour réguler la tension et la fréquence de sorte que chaque unité peut partager la demande de puissance active et réactive sans connaître les situations des autres [24].

Un compromis entre ces deux schémas de contrôle extrêmes peut être obtenu au moyen d'un schéma de contrôle hiérarchique composé de trois niveaux de contrôles : Primaire, secondaire et tertiaire [25, 26, 27].

#### 2.5.3 Contrôle primaire

La commande primaire est conçue pour satisfaire aux exigences suivantes :

- Stabiliser la tension et la fréquence.
- Offrir des capacités **plug and play** pour les REDs et partager correctement la puissance active et réactive entre eux, de préférence, sans aucune liaison de communication.
- Atténuer les courants de circulation qui peuvent provoquer un phénomène de surintensité (over-current) dans les appareils électronique de puissance.

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

La commande primaire fournit les points de consigne d'un régulateur inférieur qui sont les boucles de régulation de tension et de courant des REDs. Ces boucles internes sont communément appelées contrôle de niveau zéro [28].

### 2.5.4 Contrôle secondaire

La régulation secondaire a généralement un temps d'échantillonnage de quelques secondes à quelque minute (c'est-à-dire plus lente que la précédente), ce qui justifie la dynamique découplée des boucles de régulation primaire et secondaire et facilite leur conception individuelle. La consigne de la régulation primaire est donnée par la régulation secondaire [26]. Dans lequel, en tant que contrôleur centralisé, il rétablit la tension et la fréquence du MR et compense les déviations causées par les variations des charges ou des sources renouvelables. La commande secondaire peut également être conçue pour répondre aux exigences de la qualité de l'énergie ; Exemple d'équilibrage de tensions sur les bus critiques.

### 2.5.5 Contrôle tertiaire

Le contrôle tertiaire est le dernier niveau de contrôle (le plus lent) qui prend en compte les préoccupations économiques dans le fonctionnement optimal du MR (le temps d'échantillonnage est de quelques minutes à quelques heures) et qui gère le flux de puissance entre le MR et le réseau principal [27].

Ce niveau implique souvent la prévision des conditions météorologiques, de tarif du réseau et des charges dans les heures ou les jours à venir pour concevoir un plan de répartition des générateurs qui permet de réaliser des économies. En cas d'urgence comme une panne de courant, le contrôle tertiaire pourrait être utilisé pour gérer un groupe de MRs interconnectés afin de former ce qu'on appelle un " regroupement de micro-réseaux " qui pourrait agir comme une centrale électrique virtuelle et continuer à fournir au moins les charges critiques. Le contrôle tertiaire facilite la planification de l'exploitation du flux de puissance et la gestion de l'achat et la vente de l'énergie entre les consommateurs ou entre le MR et le réseau principal en temps réel. Ce niveau de contrôle est nécessaire uniquement en mode connecté au réseau, car il ne fait pas partie de MR lui-même, mais du réseau principal ; pendant le fonctionnement autonome, la coordination la plus haute est généralement réalisée par le contrôle secondaire.

## 2.6 Configuration des systèmes MRs

Un système MR peut être classé en deux catégories selon le type de bus de connexion : AC, DC, ou hybride. En outre, chaque type de MR présente des avantages et des inconvénients.

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

### 2.6.1 Micro-réseau de type DC

Le système MR à courant continu (DC) se compose de deux types de générateurs d'électricité : les générateurs d'énergie distribuable (dispatchable) tels que les piles à combustible, les générateurs diesel ou les micro-turbines (à gaz) et les générateurs à énergie non distribuable (non-dispatchable) tels que : les générateurs photovoltaïques et les éoliennes, de plus il contient des stockages d'énergie sous forme super-condensateurs ou des batteries. Figure 2.1 montre la configuration de base d'un MR de type DC. Tous les générateurs et les unités de stockages susmentionnés sont connectés au bus commun DC avec différentes configurations des convertisseurs électronique de puissance qui sont utilisés pour relier ces sources de production au bus DC. Ces convertisseurs permettent de gérer le flux d'énergie entre les générateurs, les sources de stockage et la charge, et d'ajuster la tension du bus DC quelles que soient les variations de tension à leurs entrées.

Le MR DC peut être utilisé en mode connecté au réseau ou en mode autonome. Il présente plusieurs avantages opérationnels [29]:

- La synchronisation des groupes électrogènes distribués n'est pas nécessaire.
- La fluctuation de la puissance générée par les générateurs distribués et la puissance de charge peut être compensée dans la ligne à courant continu en utilisant des dispositifs de stockage d'énergie.
- Les charges ne sont pas affectées par l'affaissement de tension, le gonflement de tension, le déséquilibre de tension triphasé et les harmoniques de tension.
- La qualité d'alimentation n'est pas affectée par le courant d'appel, les charges monophasées et les générateurs monophasés.
- Ils ont un rendement supérieur à celui de MR AC.
- Le MR DC n'utilise pas de transformateurs, ce qui le rend plus efficace, plus petit en taille, et fiable dans un système d'alimentation DC. De plus, un MR DC fonctionne avec un câble à deux fils.
- La plupart des charges qui sont connectées à un MR en courant continu sont des charges conventionnelles, généralement appareils électroniques, téléviseurs, ordinateurs, lampes

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

fluorescentes, variateurs de vitesse, appareils de ménages, et les appareils industriels, ainsi, étant connectés à un MR de type DC. Il n'est pas nécessaire de convertir plusieurs étages du système d'alimentation, tels que AC en DC, DC en AC ou AC en DC en DC, comme cela serait nécessaire pour un MR AC.

- La plupart des systèmes de production décentralisée utilisés dans les MRs sont des unités PV et des piles à combustible alimentées en courant continu. Les périphériques de stockages ont une tension de sortie DC, leur connexion au MR DC n'aura besoin que d'un régulateur de tension, par rapport à un MR AC, c.à.d. on doit synchroniser le système en faisant correspondre l'amplitude de la tension, la phase et l'intensité de l'alimentation sur le réseau.

### 2.6.2 Micro-réseau de type AC

Toutes les unités de production distribuées qui produisent une puissance de sortie AC, comme les éoliennes et le biogaz, peuvent être directement reliées à une ligne de bus AC du MR, les groupes électrogènes à courant continu tels que les générateurs photovoltaïques et les piles à combustibles ainsi que les dispositifs de stockage d'énergie seront connectés au bus AC par l'intermédiaire d'onduleur à courant continu et alternatif DC-AC.

- Un MR de courant alternatif dispose d'une installation permettant d'utiliser l'infrastructure existante du réseau électrique, en raison de la nature de son système électrique et de sa compatibilité avec le réseau électrique. Lors de l'utilisation d'un MR AC, il n'est pas nécessaire de reconfigurer les charges ou le système d'alimentation de l'immeuble, ceci implique que les charges AC sont connectées directement au MR AC sans aucune conversion de puissance via une interface de convertisseur DC-AC [30]. De plus, il contribue à la stabilité du réseau de distribution d'électricité en offrant un support de puissance réactive pour l'équilibrage et les services auxiliaires. Figure 2.2 montre la structure typique d'un MR de type AC.

Actuellement, le partage d'énergie pour les onduleurs parallèles a été étudié par de nombreux auteurs. Malgré plusieurs avantages fournis par ce type de MR, il y a quelques considérations techniques :

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

- La synchronisation est essentielle pour tous les générateurs AC et la sortie des convertisseurs de puissance des sources DC et des dispositifs de stockage d'énergie.
- La correction du facteur de puissance (PFC) et les topologies avancées avec des stratégies de contrôle pour la réduction de la distorsion harmonique sont nécessaires pour améliorer la qualité de l'alimentation du bus AC ; en raison des caractéristiques non linéaires des circuits convertisseurs de puissance.
- Les sources d'énergie renouvelables souffrent de variations rapides de leurs rendements, ce qui peut entraîner des variations excessives de tension et de fréquence sur le bus AC d'un MR AC. Par conséquent, les limites de leur perméabilité maximale sont normalement limitées dans le bus micro-réseau AC.

Récemment, les MRs DC ont montré des caractéristiques encourageantes telles que l'amélioration de l'efficacité du réseau et de la qualité de l'énergie, l'intégration accrue des sources d'énergie renouvelables dans le bus du MR et l'élimination de l'étape de conversion DC-AC requise dans un MR AC pour les sources et les charges renouvelables. Ainsi, certains effets négatifs associés à un MR AC peuvent être évités.

### 2.6.3 Micro-réseau hybride

Les MRs hybrides AC/DC sont l'une des approches les plus intéressantes pour le développement du concept de réseau intelligent. Une structure typique de MR hybride est illustrée sur la figure 2.3 où l'on peut distinguer les réseaux DC et AC. L'électronique de puissance bidirectionnelle est utilisée pour réaliser cette architecture. Les principaux avantages de ces MRs sont les suivants [31] :

- **Intégration** : les appareils à courant alternatif ou continu sont directement connectés au réseau avec un nombre minimum d'éléments d'interface, réduisant ainsi les étapes de conversion et donc les pertes d'énergie. Cette caractéristique rend les MRs hybrides adaptés à l'intégration des unités de plus en plus nombreuses basées sur le courant continu - par exemple, les VE, la production photovoltaïque, les piles à combustible, les dispositifs de stockages, les ordinateurs portables, les téléphones mobiles, etc.

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

- **Synchronisation** : Il n'est pas nécessaire de synchroniser les unités de production et de stockage car elles sont directement connectées au réseau alternatif ou continu. Par conséquent, la stratégie de contrôle de ces appareils est simplifiée.
- **Transformation de tension** : La modification des niveaux de tension peut être effectuée de manière simple côté courant alternatif par l'utilisation de transformateurs. Côté courant continu, la conversion est effectuée par l'utilisation de convertisseurs courant continu.
- **Faisabilité économique** : Un MR hybride peut être développé par l'ajout d'un convertisseur de puissance au réseau de distribution actuel et au réseau de communication des appareils connectés.

Cela rend le coût global plus élevé que celui des MRs AC ; à cause du convertisseur de puissance principal. Cependant, si le nombre de périphériques connectés augmente, l'investissement sera rentabilisé plus rapidement à mesure que le nombre total de convertisseurs d'interface sera réduit.

D'autre part, cette architecture présente divers inconvénients qui nécessitent des recherches plus approfondies :

- **Protection** : Une grande variété de dispositifs de protection peut être trouvée pour les réseaux à courant alternatif, car ils ont été largement étudiés et utilisés dans le réseau électrique actuel. Toutefois, les dispositifs de protection en courant continu n'ont pas fait l'objet de recherches aussi approfondies. De plus, la détection des défauts s'effectue de manière plus simple dans les réseaux à courant alternatif grâce aux passages par zéro du courant, alors que cette méthode ne peut pas être utilisée dans les réseaux à courant continu.
- **Fiabilité** : La fiabilité des MRs hybrides est inférieure à celle des MRs AC. car un convertisseur de puissance d'interface est introduit dans le réseau de distribution pour générer le lien DC. Cependant, la fiabilité des dispositifs connectés est améliorée à mesure que le nombre d'étages du convertisseur diminue.
- **Complexité du contrôle** : La gestion des MRs hybrides est plus complexe que celle de ses homologues. En effet, il est nécessaire d'effectuer le contrôle des appareils connectés aux réseaux AC et DC et du convertisseur de puissance d'interface entre eux. Par



## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

conséquent, une alimentation électrique stable et fiable doit être assurée pour les deux réseaux, et cette tâche devient difficile ; surtout lorsque le MR fonctionne en mode autonome.

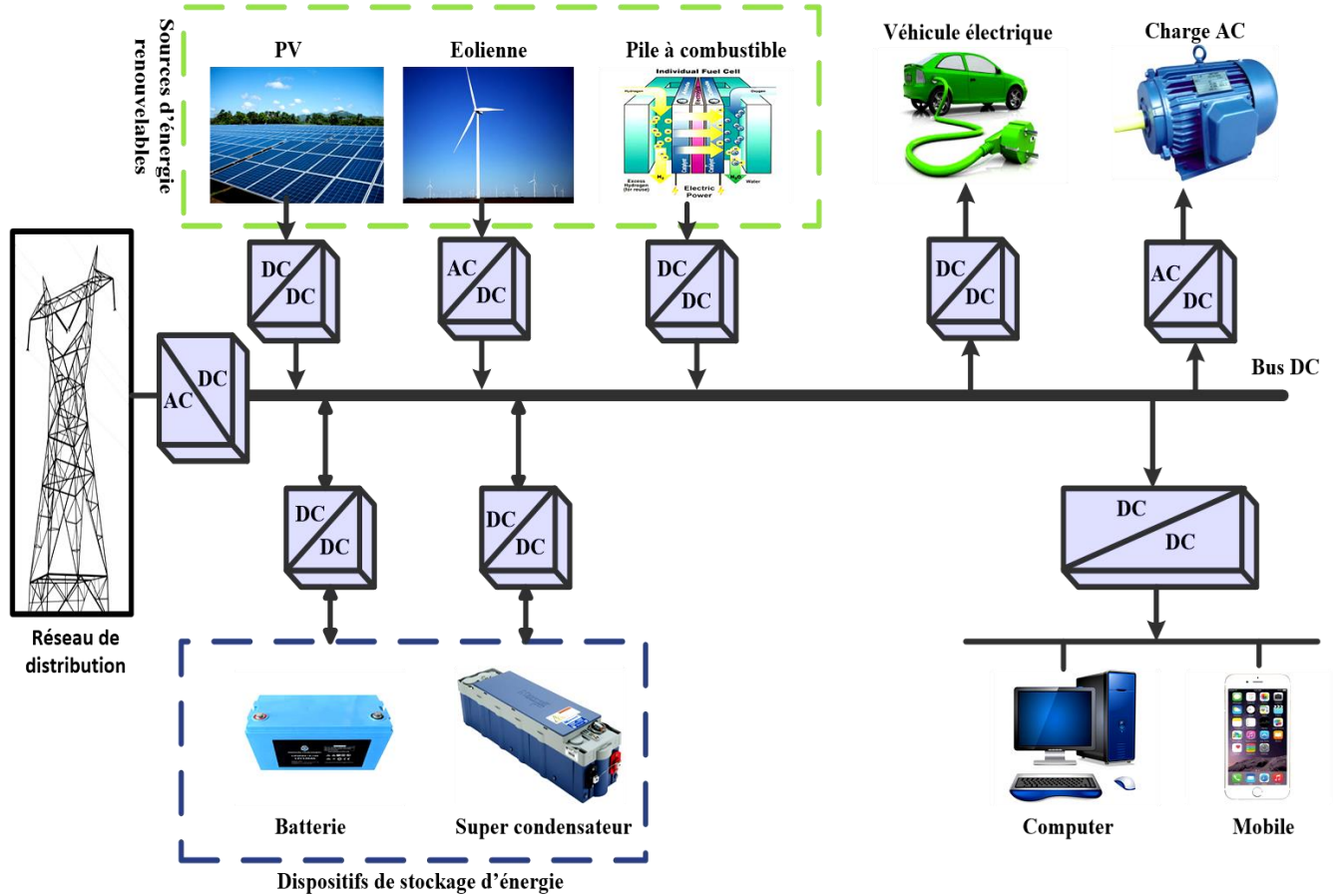


Figure 2.1 : Configuration d'un micro-réseau de type DC.

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

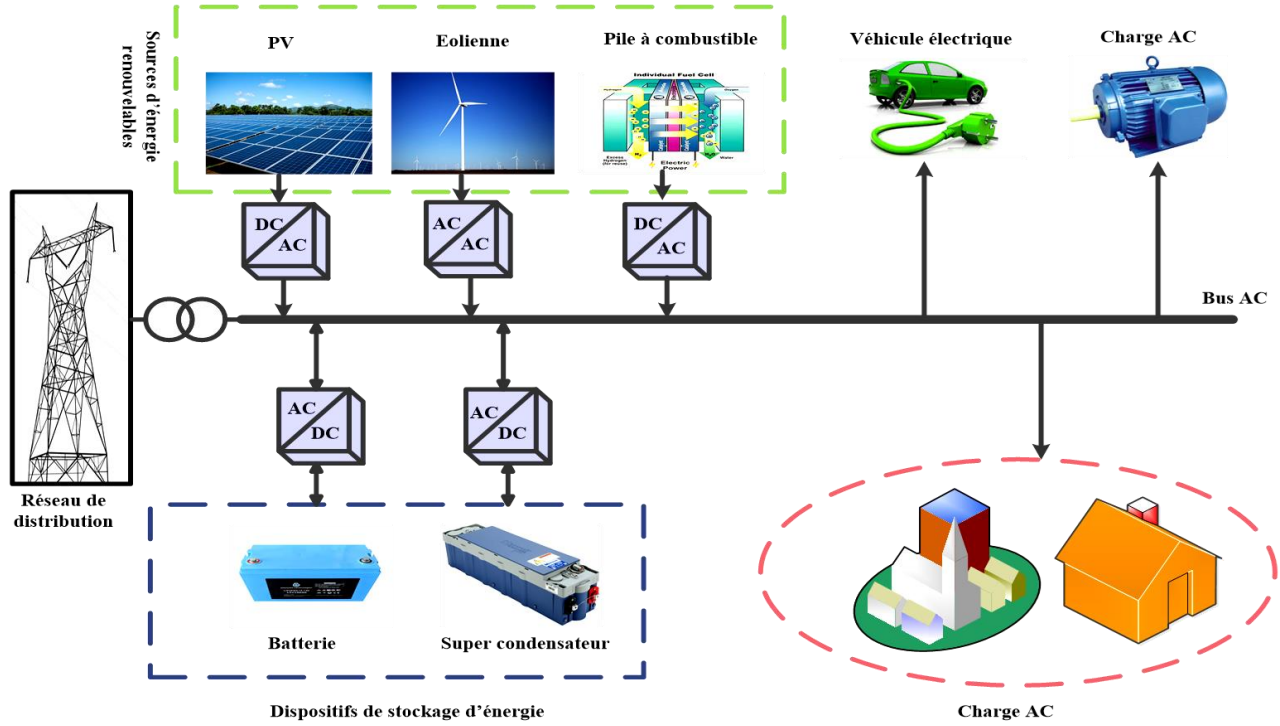


Figure 2.2 : Configuration d'un micro-réseau de type AC.

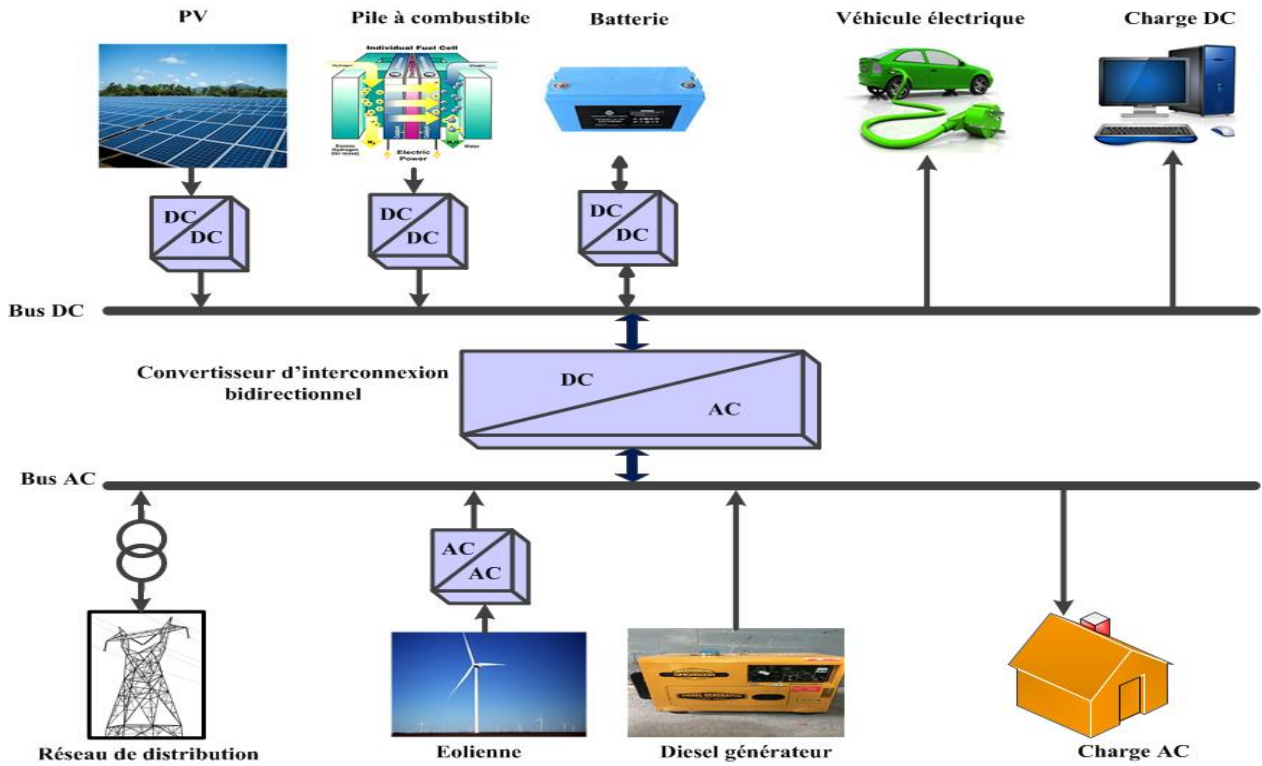


Figure 2.3 : Configuration d'un micro-réseau hybride.

### 2.7 Ressources énergétiques distribuées

Les technologies des ressources énergétiques distribuées (REDs) sont définies comme de plus petites sources d'énergie, et habituellement situées du côté de la charge du client et fournissent l'énergie nécessaire pour répondre à la totalité ou à une partie de la demande d'électricité de l'utilisateur final. De plus, ils ont la capacité de fonctionner en parallèle avec le système de distribution des services publics. Ils peuvent travailler séparément de l'entreprise de service public en tant qu'un système autonome dans une zone isolée [32].

Afin de construire un système MR, il devrait y avoir plusieurs moyens de production d'énergie qui couvrent les besoins de la charge dans les MRs. Il peut s'agir d'unités des générateurs conventionnels tels que les générateurs synchrones et à induction et des énergies renouvelables. Une intégration optimale des REDs devra permettre d'exploiter au maximum les ressources de type non polluantes et de réduire significativement l'utilisation des sources d'énergie d'origine fossiles.

Le système de contrôle de supervision définit le point de consigne de l'opération de sortie des unités distribuables. Ainsi, les générateurs synchrones sont des unités conventionnelles qui peuvent être régulées et contrôlées de l'extérieur.

Les unités de production décentralisée utilisant des sources d'énergie renouvelables sont souvent des unités non-distribuables ; leur puissance de sortie ne peut être régulée qu'en fonction de la puissance de sortie optimale de la source d'énergie primaire - par exemple, le contrôle de la puissance maximale d'un suiveur de point de puissance dans un système photovoltaïque (MPPT).

Il existe un certain nombre de technologies de production décentralisée, telles que les systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité (PCCE) et les systèmes de conversion de l'énergie éolienne (WECS), les systèmes solaires photovoltaïques, les pile à combustible, la production hydroélectrique à petite échelle et d'autres dispositifs de stockage des sources d'énergie renouvelables sont des exemples de technologies mises au point à partir des REDs. Le climat et la topologie d'une région sont des éléments importants à prendre en compte avant d'installer les REDs.

L'intégration des ressources renouvelables dépend de la taille et de la diversité de la charge, avec une limite supérieure de ~20% à 25% sans capacité de réserve tournante supplémentaire pour

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

réduire les émissions de l'intermittence ou l'utilisation de stratégies de communication et de contrôle du réseau intelligent [33].

Dans ce qui suit on va donner un aperçu des principales sources d'énergie utilisées au sein d'un MR.

### **2.8 Sources d'énergie non traditionnelles**

#### **2.8.1 Systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité**

Un système de production combinée de chaleur et d'électricité ou de cogénération produit simultanément de l'électricité et de la chaleur utiles. L'énergie électrique produite dans ce type de système varie de 10 à 100 kW ; cette capacité est utilisée localement et l'électricité excédentaire peut être envoyée au réseau ; en raison du coût élevé et des énormes pertes de transport de la chaleur, il est plutôt utilisé localement pour les procédés domestiques et industriels. Le système de cogénération atteint un rendement de plus de 80% par rapport à une centrale électrique conventionnelle qui est d'environ 35% efficace ; ceci est dû au fait que le système de cogénération est beaucoup plus proche de l'utilisateur. L'intégration d'un système de cogénération peut contribuer à réduire jusqu'à 35% de la consommation d'énergie primaire et à réduire de 30% les émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à une grande centrale thermique au charbon [34].

#### **2.8.2 Systèmes d'énergie solaire**

L'énergie solaire est l'une des ressources renouvelables les plus prometteuses à introduire dans les MRs et le futur réseau intelligent. Le taux de pénétration élevé que ce type de production d'énergie a obtenu au cours des dernières décennies confirme cette hypothèse. Les deux principales technologies de production solaire sont le thermo-solaire et le photovoltaïque. Pour la production thermo-solaire, de grandes centrales électriques sont nécessaires, d'où l'utilisation de photovoltaïque dans les MRs est plus logique.

##### **2.8.2.1 Générateur photovoltaïque**

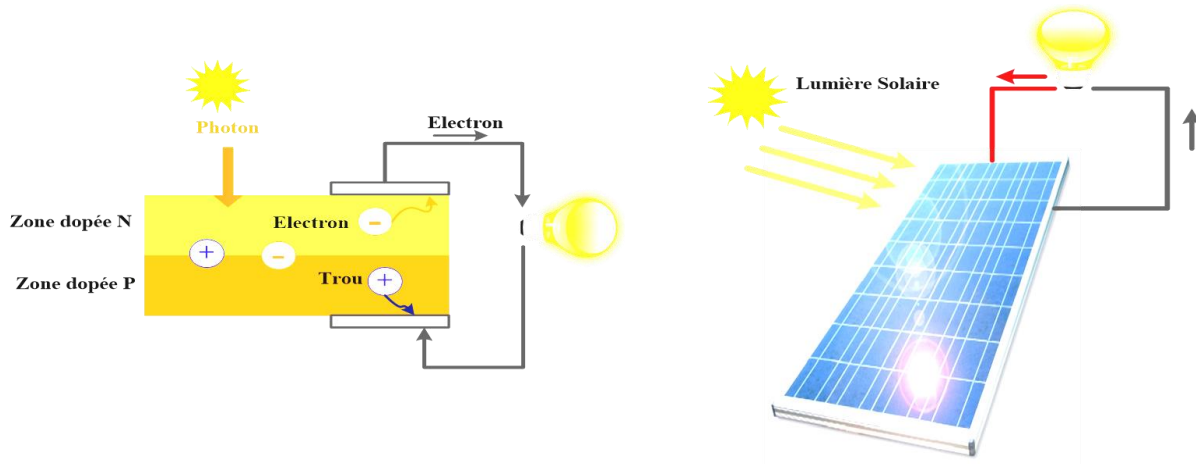
La technologie photovoltaïque (PV) convertit une forme d'énergie (lumière du soleil) en une autre forme d'énergie (électricité) en n'utilisant aucune pièce mobile, ne consommant aucun combustible fossile conventionnel, ne créant aucune pollution, et durant des décennies avec très peu de maintenance.

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

Les cellules photovoltaïques constituées de matériaux semi-conducteurs, qui ont la capacité d'absorber l'énergie solaire et de la transformer en énergie électrique utilisable (La jonction p-n convertit l'énergie lumineuse en électricité, directement proportionnelle au rayonnement incident) [35]. Ce phénomène, connu sous le nom d'effet photovoltaïque a été découvert par Edmund Becquerel en 1839, et le développement réel de la technologie photovoltaïque a commencé dans les années 1950 et a pris l'ampleur grâce au programme spatial de la NASA dans les années 1960 [36].

Le mode de fonctionnement est le suivant : Deux couches de silicium formant la cellule solaire ; l'une des couches est positive et l'autre négative ; alors quand le semi-conducteur de silicium est irradié par la lumière solaire directe, et à condition que l'énergie absorbée par la lumière solaire soit supérieure à l'énergie de bande interdite du semi-conducteur, les électrons se détachent des atomes du matériau en silicium. En d'autres termes, les électrons passent d'une bande de valence à une bande conductrice ; par conséquent, les paires d'électrons de trou sont formées dans la zone éclairée du semi-conducteur en silicium.

Les électrons se déplacent librement dans la bande de conduction et une direction spécifique est imposée par la cellule PV, ce flux d'électrons produit donc un courant électrique. Ce dernier peut être utilisé pour alimenter une charge si un circuit électrique est établi en se connectant aux couches supérieure et inférieure en silicium de la cellule solaire ; comme montre la figure 2.4.



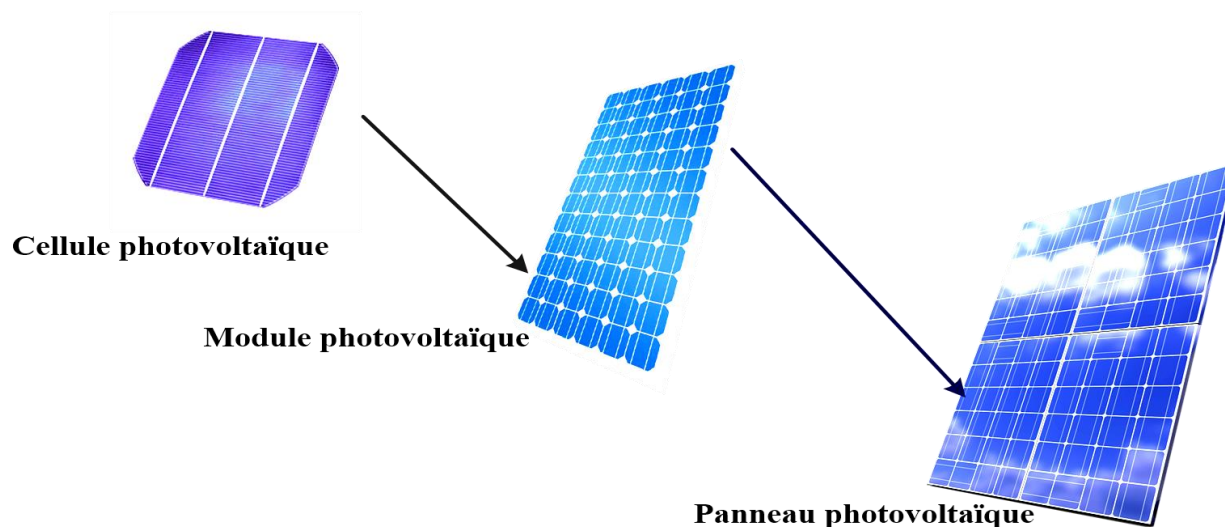
**Figure 2.4 : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.**

### 2.8.2.2 Panneaux photovoltaïques

Les cellules PV sont assemblées en modules pour fournir la puissance désirée ; elles sont connectées en série pour obtenir une haute tension et en parallèle pour obtenir un courant élevé. Les modules PV physiques sont composés d'un certain nombre de cellules PV connectées,

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

encapsulées par un panneau avant et un panneau arrière transparents. Le panneau frontal est généralement en verre trempé à faible teneur en fer. Le nombre de cellules d'un module PV peut varier selon le fabricant, mais la plupart du temps, un ensemble de 36 ou 72 cellules PV est utilisé. La progression d'une cellule photovoltaïque unique à une installation photovoltaïque est illustrée à la figure 2.5.



**Figure 2.5 : Progression de la cellule photovoltaïque.**

### 2.8.2.3 Les différents types de panneau solaire

En générale, les matériaux PV sont classés en couches cristalline ou en couches minces, et ils sont jugés en fonction de deux facteurs fondamentaux : l'efficacité et l'économie. La technologie en couche cristalline est décomposée en trois types :

**2.8.2.3.a Les cellules monocristallines :** Ce type est probablement le plus ancien. Elles sont fabriquées à partir d'un cristal de Silicium pur, qui a un réseau continu et presque aucun défaut. Ses propriétés permettent un rendement élevé de conversion de la lumière ( $\approx 15\%$ , les développements récents de Sunpower offrent des rendements améliorés allant jusqu'à 22-24%).

**2.8.2.3.b Les cellules poly-cristallines :** Les cellules poly-cristallines sont fabriquées en assemblant de multiples grains et plaques de cristaux de silicium en plaquettes minces. Les petites pièces de silicium sont plus faciles et moins chères à produire, de sorte que le coût de fabrication de ce type de PV est inférieur à celui des cellules en silicium monocristallin. Les cellules poly-cristallines sont légèrement moins efficaces ( $\sim 12\%$ ). Ces cellules sont

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

reconnaissables à leur aspect mosaïque. Elles sont également très durables et peuvent avoir une durée de vie de plus de 25 ans. Les inconvénients de ce type de technologie PV sont la fragilité mécanique et un rendement de conversion peu élevé.

**2.8.2.3.c Les cellules en couches minces (Silicium amorphe) :** Les cellules photovoltaïques à couche mince sont produites par dépôt d'une couche de silicium sur un substrat en verre. Dans ce procédé, moins de silicium est utilisé pour la fabrication que les cellules mono- cristallines ou poly-cristallines, mais cette économie se fait au détriment de l'efficacité de conversion. Les cellules PV à couche mince ont un rendement de ~6% contre ~15% pour les cellules Si monocristallines, une façon d'améliorer l'efficacité des cellules est de créer une structure en couches de plusieurs cellules. Le principal avantage de la technologie PV à couche mince est que le silicium amorphe peut être déposé sur une grande variété de substrats, qui peuvent être rendus flexibles et se présenter sous différentes formes et peuvent donc être utilisés dans de nombreuses applications. Le silicium amorphe est également moins sujet à la surchauffe, ce qui diminue généralement la performance des cellules solaires. Le silicium amorphe est le plus développé parmi les couches minces PV.

Un seul module PV ne peut généralement pas produire suffisamment d'énergie pour répondre aux besoins de la charge. Plusieurs modules PV adjacents sont reliés électriquement pour former une installation photovoltaïque. L'interconnexion entre les modules et le nombre de modules serait déterminé par les besoins du réseau.

### **2.8.2.4 Configuration de système photovoltaïque**

Les systèmes PV sont exploités en utilisant différents types de structures de configuration; chaque configuration est reliée à un dispositif électronique de puissance pour connecter avec un MR ou le réseau principal. La structure de configuration la plus courante est l'installation centralisée de l'onduleur. Plusieurs panneaux photovoltaïques sont reliés entre eux en série ou en parallèle à un onduleur centralisé, qui convertit le courant continu généré en courant alternatif.

Les caractéristiques non linéaires des panneaux photovoltaïques et les conditions environnementales imprévisibles ont un effet négatif sur le rendement d'un panneau PV. C'est pour cette raison que l'on doit ajouter un algorithme d'ajustement ; qui contrôle en temps réel le point de fonctionnement maximale MPPT (maximum power point tracking). Par conséquent,

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

MPPT doit être implémenté sur le PV où il fait varier le point de fonctionnement de module avec l'intention que les modules fournissent la puissance maximale disponible.

L'énergie maximale du rayonnement solaire se produit lorsque la dérivée de puissance est égale à zéro ; Il existe une puissance de crête correspondant à une tension et à un courant particulier. Les différentes techniques de contrôle de l'MPPT seront présentées dans le chapitre suivant.

### 2.8.2.5 Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques

Dans un générateur photovoltaïque on distingue les avantages suivants :

- Cette technologie de production d'électricité a été adaptée dans des endroits où la lumière du soleil est évidemment permanente tout au long de l'année.
- L'utilisation de modules électroniques de puissance pour l'intégration au réseau et/ou le stockage de cette énergie dans des batteries pour l'alimentation nocturne augmente les possibilités d'expansion de cette technologie comme l'un des systèmes de production d'énergie alternative les plus flexibles.
- Un taux de pollution nulle, sachant que les PV transforment l'énergie solaire en énergie électrique sans aucune pollution.
- En particulier, la modularité que l'on peut obtenir avec les panneaux PV les rendent particulièrement intéressants dans les endroits où l'accès au réseau électrique est limité ou impossible.
- Il ne nécessite pas un grand entretien, ce qui nous donne un coût relativement faible.

Les principaux inconvénients de cette technologie sont :

- Impossibilité de produire de l'électricité pendant la nuit, ou même dans des environnements nuageux.
- Les générateurs photovoltaïques ont besoin de système d'énergie auxiliaire pour recueillir le surplus d'énergie (système de stockage) qui n'est pas transmise à la charge, évidemment de la fournir à nouveau dans des périodes où la demande d'énergie dépasse la demande générée, ou pendant la nuit donc une augmentation du coût.



## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

- Les prix actuels des panneaux et le nombre élevé de module nécessaires pour produire une certaine puissance à l'échelle du MW, comme c'est le cas dans les villes ou les industries.

### 2.8.3 Système de conversion d'énergie éolienne

Un système de conversion de l'énergie éolienne (WECS) transforme l'énergie éolienne en électricité. Le vent peut être considéré comme une source d'énergie renouvelable, qui a été largement développée au cours des dernières décennies en raison de sa capacité à produire une abondance d'énergie verte [37]. Par conséquent, les chercheurs et les fabricants de centrales électriques ont préféré l'énergie éolienne pour diverses raisons, comme le faible coût, le développement technologique rapide et les niveaux d'énergie pouvant être atteints. L'élément central de tout WECS est la turbine qui est soit directement fixée au générateur (dans le cas d'un générateur multipolaire), soit par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses élévatrice. Les autres composants de la WECS sont la tour, le rotor et le carter dans lesquels tous les composants sont assemblés [38]. Cependant, la production éolienne n'est pas fiable au sens technique du terme parce qu'elle se caractérise par la nature instable conditionnée par la présence du vent, dont l'absence peut entraîner des déviations potentielles de la tension et de la fréquence de sortie; un problème potentiel qui peut limiter la possibilité d'intégrer plusieurs générateurs dans un MR [39]. Pour surmonter ce problème, les éoliennes peuvent être incorporées à d'autres sources d'énergie comme une génératrice diesel de secours, des dispositifs de stockage d'énergie ou des piles à combustible.

#### 2.8.3.1 Avantages et inconvénients des éoliennes

Les éoliennes présentent certains avantages conclus-en :

- **Propre et écologique :** Il ne pollue pas l'air comme une centrale électrique dépendante de la combustion de combustibles fossiles. Il ne produit pas d'émissions atmosphériques qui causent des pluies acides ou des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou méthane (CH<sub>4</sub>)). Le bruit et la pollution visuelle sont tous deux des facteurs environnementaux, mais ils n'ont pas d'effet négatif sur la terre, la nappe phréatique ou la qualité de l'air que nous respirons.

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

- **Renouvelable et durable :** Les vents sont causés par le réchauffement de l'atmosphère par le soleil, les irrégularités de la surface terrestre et la rotation de la terre. Tant que le soleil brille, le vent souffle, l'énergie produite peut être exploitée et elle ne s'épuisera jamais, contrairement aux réserves de combustibles fossiles de la Terre.
- **Rentable :** L'énergie éolienne est totalement gratuite. Il n'y a pas de marché pour la demande et l'offre d'énergie éolienne ; Elle peut être utilisée par n'importe qui, et elle est l'une des technologies renouvelables les moins chères actuellement disponibles.
- **Installation industrielle et domestique :** Les éoliennes peuvent être construites sur des fermes ou des ranchs existants où l'on trouve la plupart des meilleurs sites éoliens. Les éoliennes n'utilisent qu'une fraction des terres, ce qui ne cause aucun problème de travail pour les agriculteurs et les éleveurs, fournissant aux propriétaires fonciers des revenus supplémentaires payés par les propriétaires des centrales éoliennes. De nombreux propriétaires fonciers choisissent d'installer des éoliennes plus petites et moins puissantes afin de fournir une partie de l'électricité domestique.

Malgré ces avantages l'énergie éolienne présente quelques inconvénients :

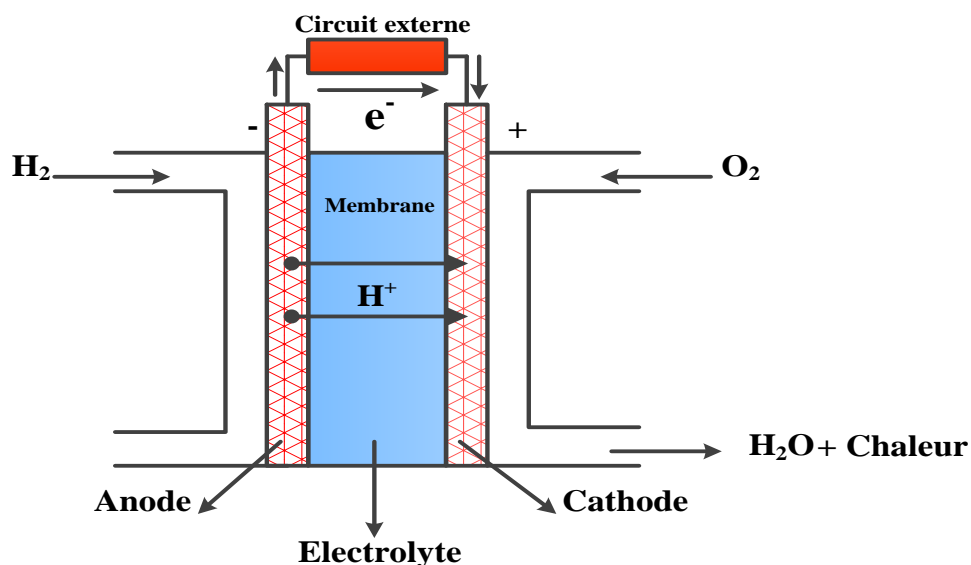
- **Fluctuation du vent et bons sites éoliens :** L'énergie éolienne a l'inconvénient de ne pas être une source d'énergie constante. Bien que l'énergie éolienne soit durable et ne s'épuisera jamais, le vent ne souffle pas toujours, cela peut causer de sérieux problèmes aux développeurs des éoliennes qui passent souvent beaucoup du temps et d'argent à rechercher si un site particulier convient ou non pour la production d'énergie éolienne.
- **Pollution sonore et esthétique :** Les éoliennes génèrent des nuisances sonores et visuelles. Une seule éolienne peut être entendue à des centaines de mètres de distance. Bien que des mesures soient souvent prises pour installer les éoliennes loin des habitations. Beaucoup de gens aiment l'apparence des éoliennes, d'autres non et les voient comme une tache dans le paysage.

### 2.8.4 Systèmes de production d'énergie à piles à combustible

Une pile à combustible fonctionne comme une batterie en convertissant l'énergie chimique des réactifs en électricité, mais elle diffère d'une batterie par le fait que tant que le carburant (tel que

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

l'hydrogène) et un oxydant (tel que l'oxygène) sont fournis, il produira l'électricité en courant continu (plus l'eau et la chaleur) comme montre la figure 2.6.



**Figure 2.6 : Schéma Fonctionnel de la pile à combustible.**

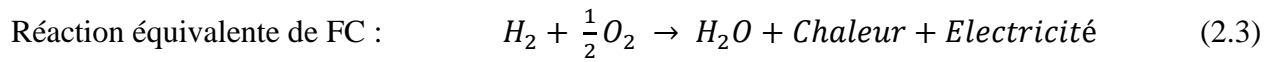
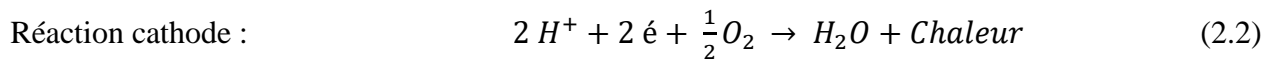
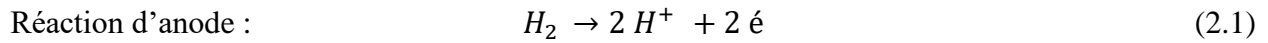
Les premières piles à combustible pratiques ont été mises au point dans les années 1960 [40], puis utilisées dans le cadre des programmes Gemini et Apollo des États-Unis pour des applications spatiales. Depuis lors, les piles à combustible ont aussi été de plus en plus utilisées pour des applications terrestres, bien qu'elles demeurent une "nouvelle" technologie dans la mesure où leur commercialisation est en cours.

L'essor récent du développement et de la commercialisation des piles à combustible s'explique par ses nombreux avantages. Il s'agit notamment des sous-produits "propres": (par exemple, l'eau lorsqu'elle fonctionne à l'hydrogène pur), ce qui signifie qu'il s'agit d'une "émission zéro" avec une émission extrêmement faible (s'il y en a) d'oxydes d'azote et de soufre. De plus, ils fonctionnent silencieusement, sans pièces mobiles, même lorsqu'ils travaillent avec des équipements de traitement et d'alimentation de carburant supplémentaires.

En outre, ils ont une densité de puissance élevée et un rendement élevé, généralement supérieur à 40% dans la production d'énergie électrique, ce qui est mieux que les groupes électrogènes/moteurs à combustion traditionnels, et la chaleur "résiduelle" d'une pile à combustible peut être utilisée pour le chauffage, augmentant ainsi son rendement global.

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

La conversion de l'énergie dans les piles à combustible (FC) est basée sur des réactions chimiques qui nécessitent de l'hydrogène et de l'oxygène pour leur développement. La section du réacteur d'un système de piles à combustible comprend une membrane d'échange ionique située entre une anode et une cathode. Par l'anode, l'hydrogène sous pression entre dans la pile à combustible, qui est dissociée en électrons et en ions  $H^+$ , ici les électrons traversent la charge électrique, tandis que les ions  $H^+$  vont à la cathode, où ils réagissent avec l'oxygène, produisant de l'eau et de la chaleur. Cette opération peut être résumée par les réactions suivantes :



Compte tenu les différents technologies avancées dans le développement des sous-systèmes auxiliaires, les piles à combustible ne sont pas seulement utilisées dans les systèmes de production fixes [41], mais aussi dans les applications embarquées, y compris l'automobile, le ferroviaire et autres [42, 43]. Parmi les technologies de piles à combustible, la plus développée au cours des dernières années est la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), cette classe de piles à combustible se caractérise par une densité de puissance élevée, une faible corrosion et une faible température de fonctionnement, ce qui la rend idéale pour les applications à démarrage rapide. D'autres types de piles à combustible sont résumés sur le tableau 2.1.

En termes de production d'énergie dans les piles à combustible, il est nécessaire de rappeler qu'une seule pile donne seulement jusqu'à 1.2V. Par conséquent, il faut tenir compte des cheminées de piles à combustible, formées par de multiples connexions série-parallèle de plusieurs piles individuelles. Pour une demande de courant  $I$  dans le circuit externe, on obtient l'expression générale suivante pour la tension de la pile à combustible :

$$V(I) = N_c \left[ E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \right] - \alpha I - \beta \ln I - \eta e^{\theta I} \quad (2.4)$$

Où  $E_0$  est la tension d'activation (environ 1.2V),  $N_c$  est la quantité de cellules connectées en série,  $R$  est la constante de gaz universelle,  $T$  est la température interne de la pile à combustible,  $F$  est

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

la constante de Faraday.  $P_{H_2}, P_{O_2}, P_{H_2O}$  Sont les pressions partielles de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'eau respectivement, et  $\alpha, \beta, \eta, \theta$  sont des paramètres constants obtenus à partir de la courbe de polarisation de la pile à combustible.

Enfin, l'énergie électrique produite par une pile à combustible peut être exprimée sous la forme :

$$P = VI \quad (2.5)$$

Type de pile à combustible	Type de carburant	Matériau de la membrane	Température	Domaine d'applications
AFC	H <sub>2</sub>	KOH	50-200°C	Transports, générateurs portables, véhicules spatiaux.
PEMFC	H <sub>2</sub>	Polymère solide	50-100°C	Production portative et décentralisée
DMFC	CH <sub>4</sub>	Méthanol	20-90°C	Systèmes d'exploitation de faible puissance et de grande durée
PAFC	H <sub>2</sub>	Acide phosphorique	≈ 220°C	Production isolée/ distribuée : Jusqu'à plusieurs centaines de kW
MCFC	H <sub>2</sub> CO, CH <sub>4</sub>	Li, K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	≈ 650°C	Production isolée/ distribuée : Jusqu'à plusieurs dizaines de MW
SOFC	H <sub>2</sub> CO, CH <sub>4</sub>	oxyde solide	500- 1000°C	Production isolée/ distribuée : Jusqu'à plusieurs centaines de MW

**Tableau 2.1 : Caractéristiques de certaines technologies de piles à combustible [44].**

### 2.8.4.1 Avantages et inconvénients des piles à combustible

- Les principaux avantages des piles à combustible sont la possibilité d'accroître l'efficacité du système et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

- Son intégration dans les véhicules et la petite production d'énergie distribuée se sont donc accrues au cours de la dernière décennie, grâce à des stratégies et des développements bien connus en matière de contrôle.
- la possibilité de cogénération, c'est-à-dire la production de chaleur en plus de l'énergie électrique.
- Ces caractéristiques de la modularité, la simplicité d'installation, silencieux et l'aptitude à l'intégration avec des sources d'énergie renouvelables.

Malgré ces avantages, il a aussi un inconvénient réside dans leur coût extrêmement élevé, mais aussi dans le fait qu'il faut plus d'efforts et de recherche pour démontrer l'endurance et la fiabilité des unités à haute température.

### 2.8.5 Système de stockage d'énergie

Les systèmes de stockage d'énergie sont utilisés pour soutenir le réseau de distribution aux heures de pointe lorsque la consommation d'électricité des consommateurs est élevée. Ce stockage d'énergie aide le micro-réseau à équilibrer la puissance entre les charges et les unités de production, en fournissant de l'énergie lorsque les unités de micro-sources n'ont pas suffisamment d'énergie pour alimenter la charge (en particulier en présence d'un grand nombre de sources d'énergie renouvelables). Par exemple, lorsque les charges augmentent, un point est atteint lorsque les ressources distribuées ne peuvent couvrir la demande d'électricité; c'est à ce stade que l'incorporation des batteries du système de stockage booste le système en fournissant l'énergie nécessaire, et pendant la période où la demande d'énergie est plus faible, la production excédentaire d'énergie sera utilisée pour charger le dispositif de stockage d'énergie.

Il existe trois types de dispositifs de stockage d'énergie qui pourraient être contenus dans les micro-réseaux: les batteries de stockage, les volants d'inertie et les super-condensateurs. Les batteries et les super-condensateurs génèrent une tension continue, un convertisseur DC-AC bidirectionnel est donc nécessaire pour l'interface entre les périphériques de stockage et le AC MR (voir figure 2.2). Tandis qu'un convertisseur DC-DC bidirectionnel est utilisé pour la médiation du bus DC dans un MR DC (voir figure 2.1).

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

Un aperçu général des dispositifs de stockage d'énergie est présenté ci-dessous. Toutefois, la batterie sera expliquée plus en détail au fur et à mesure qu'elle sera considérée dans cette recherche.

### 2.8.5.1 Volant d'inertie

Un volant d'inertie est un accumulateur d'énergie cinétique rechargeable. Il est utilisé pour absorber l'énergie électrique d'une source, la stocker sous forme d'énergie cinétique de rotation, et ensuite le livrer à une charge en temps voulu, sous une forme qui répond aux besoins de la charge. De plus, il s'agit d'un dispositif mécanique avec un moment d'inertie significatif utilisé comme dispositif de stockage de l'énergie rotative [45]. Comme la tension produite par les générateurs à volant d'inertie est généralement sous tension alternative, une interface AC-DC est nécessaire lorsqu'ils sont utilisés avec un MR DC.

### 2.8.5.2 Super-condensateur

Condensateurs électriques à double couche, également appelés super-condensateurs ou Ultra-condensateurs; sont des dispositifs électrolytiques à très haute capacité qui stockent l'énergie sous forme de charge électrostatique, les super-condensateurs peuvent avoir des débits de décharge très élevés et peuvent supporter des changements de charge rapides dans un MR. Ils emmagasinent de l'énergie à haute densité de puissance mais sont limités dans la quantité d'énergie emmagasinée, alors que d'autres comme les batteries et les volants d'inertie qui sont capables de décharger l'énergie sur une plus longue période du temps [46]. Si une énergie ininterrompue est nécessaire pendant une longue période, les batteries sont un choix préférable.

### 2.8.5.3 Batteries

Les systèmes de stockage sur batterie jouent un rôle important dans la mise en œuvre des futurs MRs et les réseaux intelligents (RIs) et dans la conception des véhicules électriques.

Une batterie (voir figure 2.7) est composée d'une ou plusieurs piles électrochimiques et chaque pile est constituée d'un électrolyte liquide, pâteux ou solide, avec une électrode positive (cathode) et une électrode négative (anode). Pendant la décharge, des réactions électrochimiques se produisent au niveau des deux électrodes générant un flux d'électrons à travers un circuit externe. Les réactions sont réversibles, ce qui permet de recharger la batterie en appliquant une tension

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

externe sur les électrodes [47]. Les batteries électriques sont des dispositifs qui stockent l'énergie électrique sous forme électrochimique et fournissent directement de l'électricité en DC.

Les batteries existantes possèdent différentes caractéristiques, on peut les classées selon la quantité d'énergie qu'elles peuvent stocker. Les plus utilisées sont citées ci-dessous :

**2.8.5.3.a Batteries au Plomb :** Ce type de batterie utilise l'oxydoréduction du Plomb. Une cathode en  $PbO_2$  est réduite en  $PbSO_4$  et une anode en  $PbSO_4$  est réduite en  $Pb$ . Elle compose de plusieurs cellules, qui leurs nombre déterminent la valeur de tension.

### **2.8.5.3.b Batteries Nickel-Cadmium et Nickel-Hydrure Métallique**

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

- Le Nickel-Cadmium (Ni-Cd).
- Le Nickel-Hydrure Métallique (Ni-MH)

Ces deux types sont les plus efficaces dans les applications mobiles et portatives. Les batteries Ni-MH équipent les voitures hybrides telles que la Toyota Prius.

### **2.8.5.3.c Batteries Lithium-Ion (Li-Ion)**

Ces batteries ont le plus-grand potentiel de développement et d'optimisation ; la petite taille et le faible poids de Li-Ion offrent une grande densité d'énergie et une haute efficacité de stockage, ce qui les rendent idéales pour les applications connectées au réseau ou isolées dans les MRs [48].

Les batteries Li-Ion offrent de nombreux avantages aux opérateurs, notamment une densité d'énergie élevée dans un ensemble compact et léger permettant une installation simple, ainsi que le maintien de la stabilité malgré la variabilité des énergies renouvelables. Ce type de batterie, nécessite peu d'entretien, et peut fournir plus de dix ans de fonctionnement très efficace à un prix compétitif.



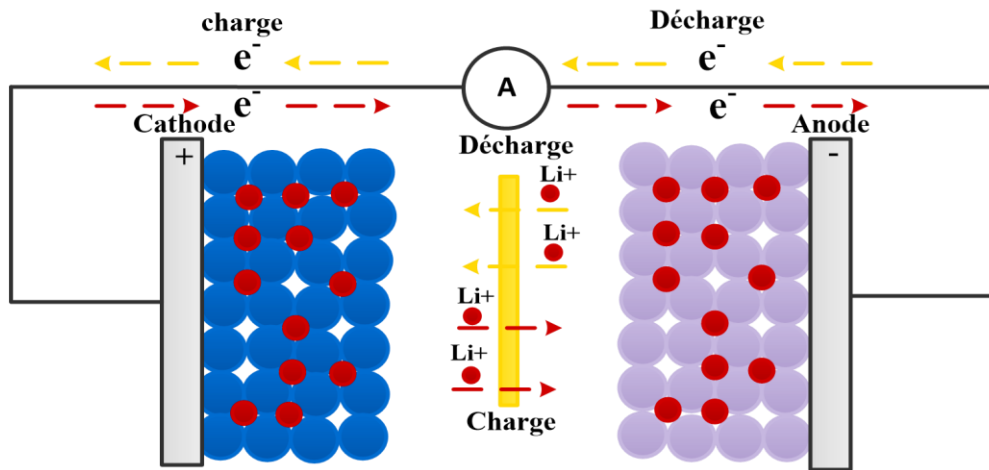


Figure 2.7 : Lithium-Ion batterie.

## 2.9 Convertisseurs d'interface des micro-réseaux

Les convertisseurs statiques sont souvent utilisés comme interface entre la génération, la distribution et la consommation d'énergie. Comme présente précédemment, un MR contient des sources d'énergie renouvelables en DC avec une tension variable (comme les PV) ou quasi-fixe (comme les batteries) et la connexion avec le réseau AC a une fréquence fixe de 50Hz. Donc chaque connexion avec le bus DC nécessite un convertisseur adéquat. Dans le passé, ces conversions ont été réalisés à l'aide des convertisseurs électromécaniques qui sont volumineux et peu flexibles. Aujourd'hui, grâce aux avancements dans le domaine de l'électronique de puissance ; les composants semi-conducteurs permettent de faire la conversion d'énergie efficace, de réduire le volume et le poids du convertisseur, ainsi que de contrôler la tension et le courant avec une précision et un coût de moins en moins cher.

L'électronique de puissance permet de filtrer les harmoniques indésirables dans le réseau électrique, d'ajuster les niveaux de tension en fonction des différentes applications et de convertir l'alimentation courant continu en courant alternatif ou vice versa. En outre le raccordement des groupes électrogènes décentralisés au moyen d'interface électronique de puissance fournit des services supplémentaires, tels que le soutien de la puissance réactive, le suivi de la charge, le service de secours, la réduction des pointes et la compensation des perturbations de la qualité de l'énergie, qui contribuent tous à un fonctionnement satisfaisant du réseau. Il est donc valable d'affirmer que sans dispositifs électroniques de puissance, la fourniture sophistiquée d'énergie électrique du système de sous-transmission au compteur de l'utilisateur final n'est pas réalisable. Un certain nombre de configurations de convertisseurs, tels que les redresseurs AC-DC, les

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

hacheurs DC-DC et les onduleurs DC-AC, sont nécessaires au sein d'un MR, comme montre les figures (2.1-2.2). Les convertisseurs de puissance peuvent être classés selon différentes catégories : Convertisseurs unidirectionnels et bidirectionnels, convertisseurs survolteurs (boost), abaisseurs (dévolteur) (buck) et abaisseur-survolteur (buck-boost), convertisseurs a entrée unique et multiples, convertisseurs pour des applications de faible puissance et de puissance élevée... etc. Les convertisseurs sont étudiés en fonction de leurs efficacités, réponse dynamique, gain, tension de commutation, perte de commutation, robustesse, ondulation de tension et de courant, harmoniques et large plage de fonctionnement.....etc.

### 2.9.1 Convertisseurs DC- DC

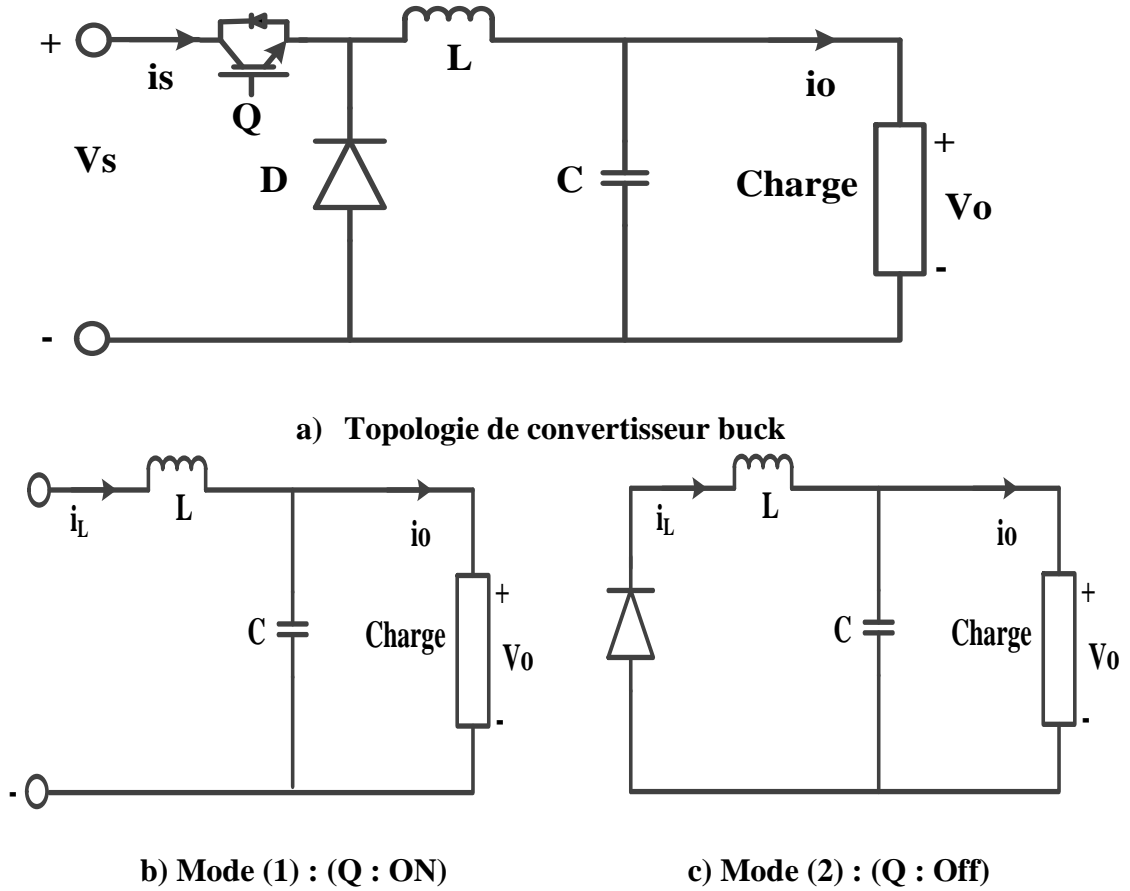
Un convertisseur DC-DC est utilisé pour changer le niveau de tension d'une source DC à une autre. En fonction de la relation entre les tensions d'entrée et de sortie, un convertisseur DC-DC peut être conçu pour réduire le niveau de tension, pour l'augmenter ou les deux. Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie est appelé rapport de conversion  $\alpha$ . Lorsqu'il est inférieur à 1, le convertisseur est appelé convertisseur buck (dévolteur), lorsqu'il est supérieur à 1, le convertisseur est appelé convertisseur boost (survolteur), lorsqu'il peut être supérieur ou inférieur à 1, le convertisseur est appelé convertisseur buck-boost (dévolteur-survolteur) [49].

#### 2.9.1.1 Convertisseur buck (dévolteur)

Le convertisseur buck (dévolteur) est un abaisseur de tension. La figure 2.8 montre un circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur typique qui se compose de deux interrupteurs (un transistor et une diode), d'une inductance et d'un condensateur.

L'inductance et le condensateur agissent comme un filtre pour améliorer la qualité de la tension de sortie et le courant de charge. L'interrupteur Q est allumé et éteint périodiquement. Supposons que la période de commutation est T et que le rapport cyclique est k. Ensuite, le temps d'arrêt dans une période est  $(1-k)T$ .

Le circuit a deux modes de fonctionnement : Mode 1 : Lorsque l'interrupteur Q est allumé et Mode 2 lorsque l'interrupteur Q est éteint. Les figures 2.8.b et 2.8.c, montrent les circuits équivalents dans les deux modes respectivement.



**Figure 2.8 : Circuit équivalent de convertisseur buck.**

En mode 1, le courant d'inductance  $i_L$  augmente linéairement parce que :

$$L \frac{di_L}{dt} = v_s - v_o \quad (2.6)$$

Où  $v_s - v_o$  est presque constant et positif. En mode 2, les roues libres du courant d'inductance à travers la diode et diminue linéairement parce que :

$$L \frac{di_L}{dt} = 0 - v_o \quad (2.7)$$

Où  $-v_o$  est pratiquement constant et négatif. En régime permanent, l'énergie nette changée dans l'inductance doit être nulle pendant une période, ce qui signifie que le courant augmenté en mode 1 doit être égal au courant diminué en mode 2; c'est-à-dire

$$\frac{kT}{L} (v_s - v_o) = \frac{(1-k)T}{L} v_o \quad (2.8)$$

Par conséquent, la tension de sortie est :

$$v_o = k v_s \quad (2.9)$$

En effet, c'est un convertisseur buck à cause de  $\alpha = k$ .

### 2.9.1.2 Convertisseur boost (survolteur)

Un convertisseur survolteur de tension est aussi appelé élévateur de tension ; car la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Par conséquent, le courant de sortie est inférieur au courant d'entrée en raison du bilan de puissance. La figure 2.9.a montre un convertisseur survolteur de tension. De même, il y a également deux modes de fonctionnement lorsque l'interrupteur Q est allumé et éteint. Les figures 2.9.b et 2.9.c, respectivement, montrent les circuits équivalents dans ces deux modes.

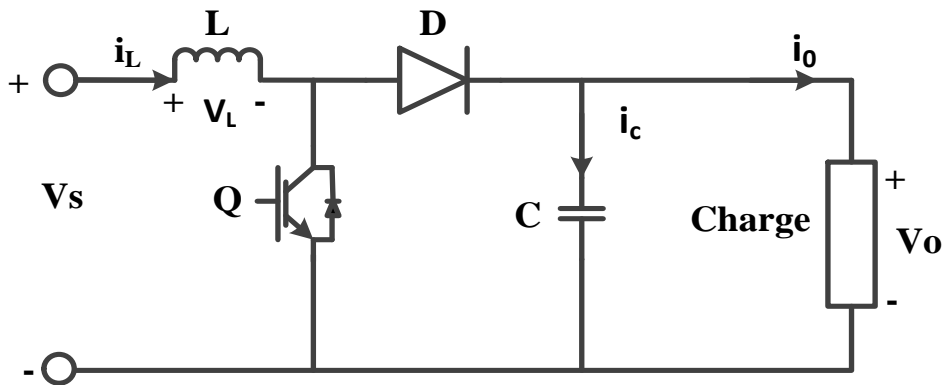
En mode 1, le courant d'inductance augmente linéairement parce que :

$$L \frac{di_L}{dt} = v_s - 0 \quad (2.10)$$

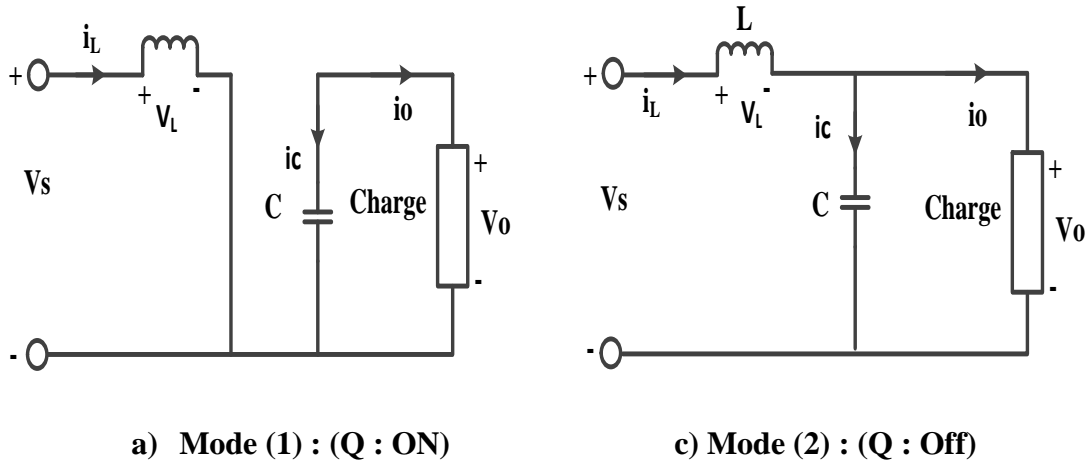
et l'inductance emmagasine l'énergie de la source d'alimentation pendant que le condensateur se décharge pour alimenter la charge. En mode 2, l'énergie stockée dans l'inductance et celle de la source d'alimentation sont transférées à la charge et au condensateur.

Le courant d'inductance diminue linéairement parce que :

$$L \frac{di_L}{dt} = v_s - v_o \quad (2.11)$$



a) Topologie de convertisseur boost.



**Figure 2.9 : Circuit équivalent de convertisseur boost.**

De même, l'énergie nette changée dans l'inductance doit être nulle pendant une période dans le régime permanent ; Ce qui signifie que le courant augmenté en mode 1 doit être égal au courant diminué en mode 2. C'est-à-dire :

$$\frac{kT}{L} v_s = \frac{(1-k)T}{L} (v_o - v_s) \quad (2.12)$$

A partir de laquelle la tension de sortie peut être dérivée comme suit :

$$v_o = \frac{1}{1-k} v_s \quad (2.13)$$

En effet, il s'agit d'un convertisseur boost car  $\alpha = \frac{1}{1-k} > 1$  pour  $k \in (0,1)$  .

### 2.9.1.3 Convertisseur dévolteur – survolteur (Buck-Boost)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou de plus grande valeur mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce type de convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée à zéro ; compliquant ainsi sa commande. Similaire aux convertisseurs buck et boost décrit précédemment, ce convertisseur a deux mode de fonctionnement. La figure 2.11 montre la topologie de ce convertisseur.

La tension de sortie est calculée de la façon suivante :

Durant l'état passant (Mode 1), l'interrupteur Q est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation :

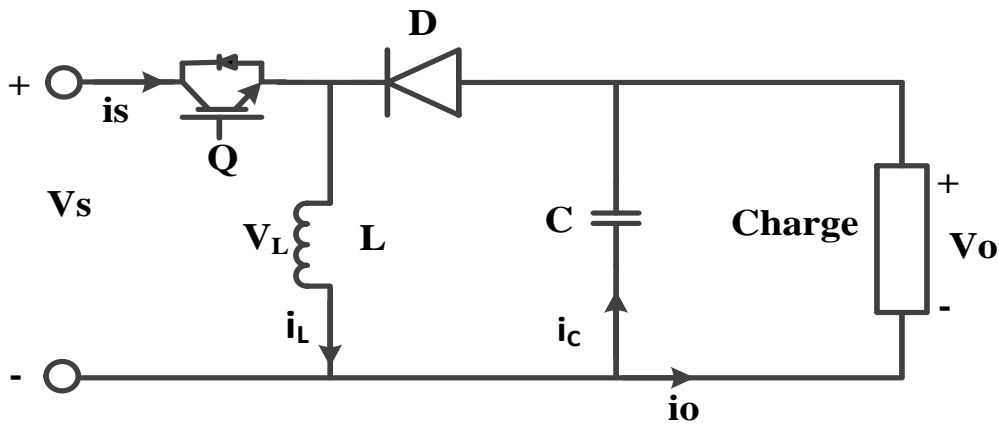
## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

$$V_s = L \frac{di_L}{dt} \tag{2.14}$$

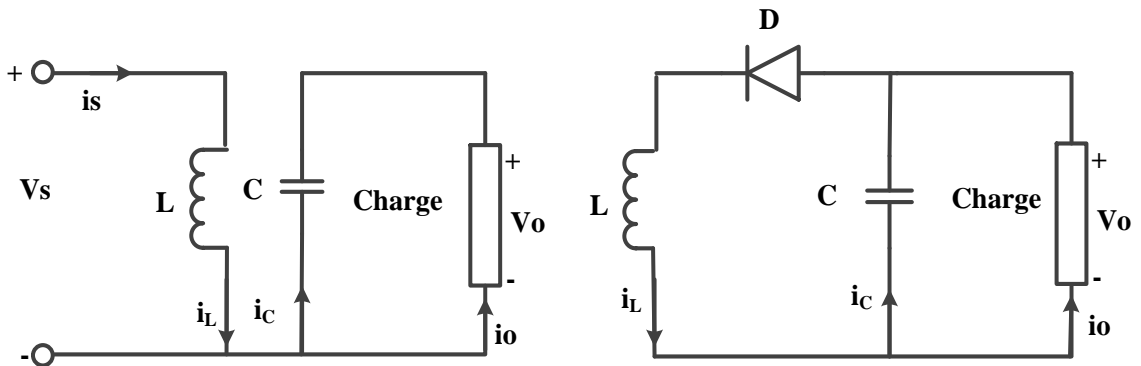
à la fin de l'état passant, le courant  $i_L$  a augmenté suivant la relation :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{\alpha T} di_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_s dT}{L} = \frac{V_s \cdot \alpha \cdot T}{L} \tag{2.15}$$

$\alpha$  est le rapport cyclique. Il présente la durée de la période  $T$  pendant laquelle l'interrupteur  $Q$  conduit, il est compris entre 0 ( $Q$  ne conduit jamais) et 1 ( $Q$  conduit tout le temps).



**a) Topologie de convertisseur Buck-Boost.**



**b) Mode (1) : (Q : ON)**

**c) Mode (2) : (Q : Off)**

**Figure 2.10: Circuit équivalent de convertisseur Buck- Boost.**

Pendant l'état bloqué (Mode2), l'interrupteur  $Q$  est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. L'évolution de  $i_L$  est :

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad (2.16)$$

Par conséquent, la variation du courant  $i_L$  est donné par :

$$\Delta i_{L_{off}} = \int_0^{(1-\alpha)T} di_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{V_o - dt}{L} = \frac{V_o(1-\alpha)T}{L} \quad (2.17)$$

En conséquent, le courant  $i_L$  traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commande ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$i_{L_{on}} + \Delta i_{L_{off}} = 0 \quad (2.18)$$

En remplaçant  $\Delta i_{L_{on}}$  et  $\Delta i_{L_{off}}$  par leur expression, on obtient :

$$\Delta i_{L_{on}} + \Delta i_{L_{off}} = \frac{V_s \cdot \alpha \cdot T}{L} + \frac{V_o(1-\alpha)T}{L} = 0 \quad (2.19)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{V_s} = -\frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (2.20)$$

Grace à cette expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours négative (le rapport cyclique  $\alpha$  variant entre 0 et 1), et que la valeur absolue augmente avec  $\alpha$ , théoriquement jusqu'à l'infini lorsque  $\alpha$  approche à 1. Si on omet la polarité, ce convertisseur est à la fois dévolteur (comme un convertisseur Buck) et survolteur (comme un convertisseur Boost). C'est pour cela qu'on le qualifie de Buck-Boost.

### 2.9.1.4 Convertisseur DC/DC bidirectionnel

Les convertisseurs de puissance DC/DC bidirectionnels jouent un rôle très important dans l'interfaçage des unités de stockage d'énergie tel que les batteries avec le MR ; parce qu'ils peuvent fonctionner en deux opérations :

- Contrôler la direction et la quantité de l'alimentation vers et depuis le périphérique de stockage.
- Contrôler le bus de liaison DC.

## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

Pour faciliter l'écoulement bidirectionnel de l'énergie, les convertisseurs ont besoin de dispositifs d'alimentation bidirectionnels comme commutateur.

Les dispositifs semi-conducteurs contrôlables à diodes antiparallèles fourniront la capacité bidirectionnelle, y compris le flux de courant positif et négatif ainsi que les capacités de blocage de tension positive et négative [50].

Figure 2.11 présente la topologie d'un convertisseur DC/DC bidirectionnel qui peut connecter une batterie avec le MR ; les commutateurs  $S_1$  et  $S_2$  se compose d'une interrupteur de puissance IGBT  $Q$  en parallèle avec une diode  $D$ , cette topologie est capable d'augmenter ou de diminuer la tension avec un flux de puissance dans les deux sens.

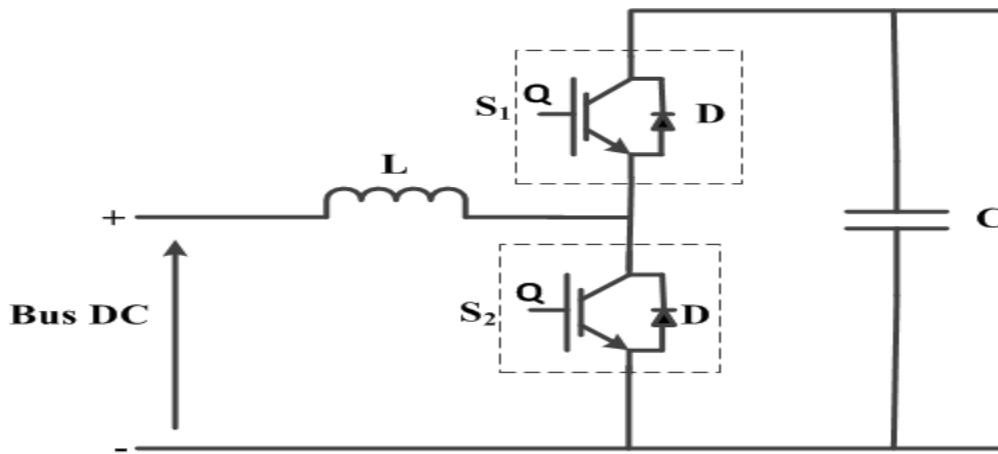


Figure 2.11 : Circuit équivalent de convertisseur bidirectionnel DC-DC.

Pendant le mode de charge, le convertisseur fonctionne comme un convertisseur Buck et charge la batterie à partir du bus DC avec un taux de conversion de :

$$\frac{V_{batterie}}{V_{DC}} = \frac{D_2}{1-D_2} \quad (2.21)$$

Où  $D_2$  est le rapport cyclique de commutateur  $S_2$ . Pendant le mode de décharge, le convertisseur fonctionne comme un convertisseur Buck ou Boost pour transférer l'énergie de la batterie vers le bus DC, en fonction de la surtension ou de la sous-tension d'état du bus DC, respectivement.

Dans ce mode le rapport de conversion de la tension continue est donnée par :

$$\frac{V_{DC}}{V_{batterie}} = \frac{D_1}{1-D_1} \quad (2.22)$$



## Chapitre II. Généralités sur les micro-réseaux

Où  $D_1$  est le rapport cyclique du commutateur  $S_1$ . Des algorithmes de contrôle appropriés déterminent les modes de charge et de décharge ainsi que les modes de fonctionnement du convertisseur en mode Buck et Boost.

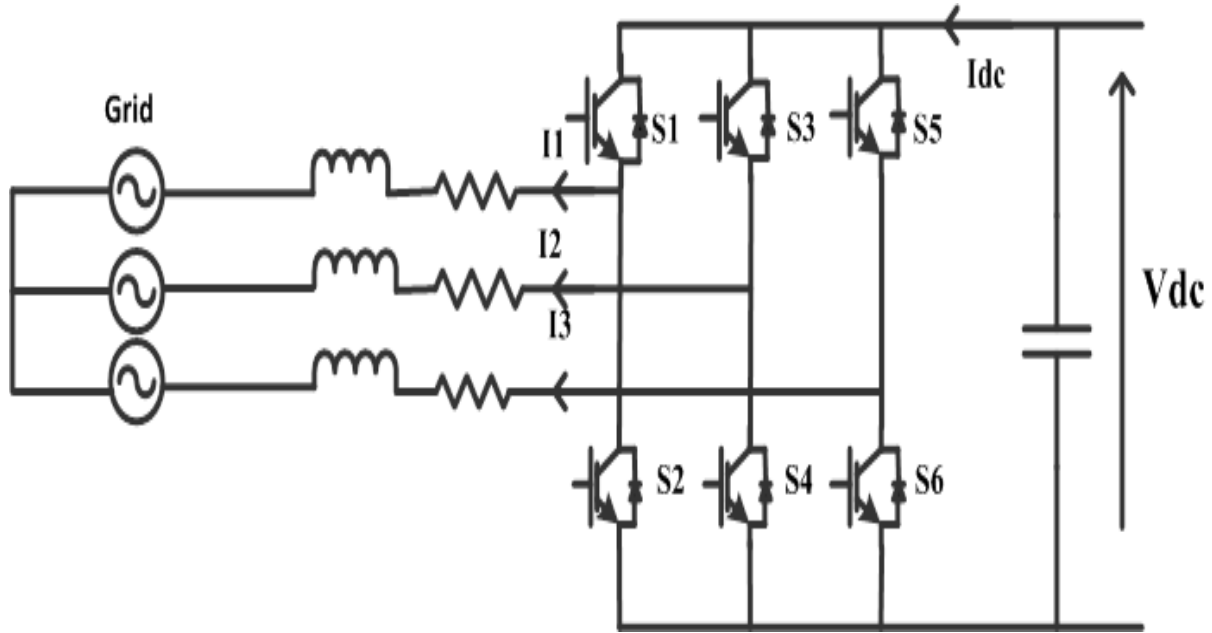
### 2.9.2 Convertisseur DC/AC

Un convertisseur DC/AC, aussi connu sous le nom "Onduleur", est un dispositif ou un circuit électronique qui transforme le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). La tension d'entrée, la tension et la fréquence de sortie, ainsi que la puissance globale dépendent de la conception de l'appareil ou de la circuiterie spécifique. L'onduleur ne produit pas l'énergie ; Mais elle est fournie par une source DC.

Il existe différents types d'onduleurs : Selon le type d'alimentation en courant continu ; un onduleur est appelé onduleur du courant (CSI) si l'alimentation est une source de courant, et un onduleur de source de tension (VSI) si l'alimentation est une source de tension ; ce dernier est le type qu'on va traiter dans notre travail.

L'onduleur aussi nommé selon le type de commande de sa sortie ; il est appelé à commande par courant si sa sortie est commandée comme source de courant et à commande par tension si sa sortie est commandée comme source de tension. Selon leur type de commutation, les onduleurs peuvent être à commutation de ligne (par exemple : ceux construits avec des thyristors ou à commutation forcée pour ceux construits avec IGBT et MOSFET).

La figure 2.12 présente la configuration d'un onduleur (VSI) qui va utiliser dans les chapitres suivants.



**Figure 2.12 : Circuit équivalent de convertisseur DC/AC.**

## 2.10 Conclusion

Ce chapitre donne des explications des systèmes micro-réseaux et ses différents types avec une présentation de différentes structures de contrôle de cette nouvelle technologie. L'exploitation des MRs nécessite une bonne maîtrise des sources des énergies renouvelables avec l'interface électronique de puissance, c'est pour cela, qu'on a consacré une étude théorique et analytique de ces dernières. Ses sources d'énergies inclus les générateurs photovoltaïques, les piles à combustible et les batteries. Par conséquent, nous avons conclu qu'on peut utiliser un système hybride de ses sources d'énergie pour former un micro-réseau, y compris un générateur PV et une pile à combustible comme des générateurs principales et une batterie employée comme source auxiliaire destinée au stockage pour compenser l'intermittence d'énergie pendant les heures de pointes.

### 3.1 Introduction

Les énergies renouvelables disponibles à l'heure actuelle comprennent l'énergie solaire, l'énergie éolienne, les piles à combustible, les systèmes de production combinée de chaleur et de l'électricité, l'hydroélectrique, la biomasse, la géothermie, l'énergie de vague et des marées. Elles sont un élément inévitable du développement des micro-réseaux, mais il est encore difficile de les intégrer correctement. L'intermittence et l'incertitude sont les principales limites de l'intégration de la production d'énergie renouvelable.

Afin d'éliminer ces inconvénients, les tendances actuelles intègrent ces sources d'énergie pour développer des systèmes énergétiques hybrides [51]. Ces systèmes hybrides multi-sources constituent des solutions attractives dans les applications de transport ainsi que pour des systèmes de production d'énergie stationnaire de petite et moyenne puissance.

### 3.2 Intégration de sources multiples (système hybride)

Au cours des dernières années, énormes améliorations ont été apportées pour que les sources d'énergie soient plus fiables. Bien que l'énergie renouvelable soit la source d'énergie efficace et propre, elle présente certains inconvénients en raison de sa nature stochastique. Par exemple, l'énergie solaire et éolienne dépendent des changements climatiques. Certaines comme les piles à combustible, ont une réponse lente. Par conséquent, ces sources d'énergies doivent être intégrées et/ou raccordées au réseau de distribution d'électricité pour constituer un système de production d'électricité multi-sources ou un système d'énergie hybride (SEH) dans lequel ces sources d'énergie se complètent pour fournir une source d'énergie fiable [52]. Un système d'énergie hybride est défini comme étant " petit ensemble d'unités coopérative, produisant de l'électricité ou de l'électricité de la chaleur, avec des vecteurs d'énergie primaire diversifiés (renouvelables et non-renouvelables), et dont l'exploitation est coordonnée par l'utilisation de systèmes électroniques de puissance avancés "[53]. Le système énergétique hybride peut fonctionner comme un système de production d'électricité autonome dans des régions où il n'y a pas d'électricité de service public ou l'extension des lignes de transport [54]. Il peut également être raccordé à un réseau de service public pour accroître la capacité, l'efficacité et la fiabilité du réseau de distribution d'électricité [55]. Même si l'intégration de sources multiples permet de surmonter l'approvisionnement irrégulier en électricité à partir de sources d'énergie renouvelables, cette interface multi-sources présente certains défis supplémentaires. Par exemple,

### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

dans un système d'énergie hybride autonome, en raison de l'intermittence de l'énergie éolienne et solaire et des conditions de charge variables, la stabilité, la fiabilité et la continuité globales du système de cette combinaison pour alimenter les charges sont encore relativement faibles. Par conséquent, un accumulateur d'énergie doit être raccordé pour compenser ou absorber la différence entre la puissance produite et la puissance requise [56].

En ce qui concerne le système raccordé au réseau, l'intégration des SER au réseau électrique a encore plus de conséquences. L'interface d'énergie renouvelable peut causer des problèmes de qualité de l'énergie en raison des variations de tension d'alimentation. Si les SER sont connectées au départ avec moins de charge, il y'a une chance d'inverser le flux de puissance. De même une variation rapide du courant de charge provoque une variation du courant d'alimentation qui a des effets néfastes tels que les creux et les clignotements de la tension du système. Un autre problème est celui des courants harmoniques qui peuvent causer une distorsion de la forme d'onde de tension qui peut se déplacer jusqu'au réseau de distribution [57].

Afin d'accroître l'utilité des SER et de réduire leurs impacts négatifs potentiels, comme indiqué ci-dessus, l'interface électronique de puissance (EP) peut être utilisée pour intégrer les SER au réseau électrique existant [58].

La qualité et la fiabilité de l'énergie électrique dépendent de l'efficacité, de la fiabilité et de la durabilité des appareils électronique de puissance. L'interface EP peut gérer la conversion et le contrôle de l'énergie électrique à l'aide de convertisseurs de puissance à découpage. Avec l'introduction de dispositifs électroniques de puissance fiables et peu coûteux, la plupart des problèmes induits par l'infiltration des sources d'énergie renouvelables peuvent être minimisés ou éliminés. Certains avantages des équipements EP sont soulignés comme suit :

- la qualité de l'énergie de système énergétique hybride peut être améliorée grâce à l'interface EP qui contrôle non seulement les harmoniques du courant et de la tension, mais fournit également un fonctionnement rapide et minimise les besoins en puissance réactive du réseau [59]. Les onduleurs qui interfacent ces sources énergétiques sont auto-commutés et sont capables de produire la tension alternative, ce qui permet au SEH de produire la puissance à n'importe quel moment [60].

### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

- L'ajout des sources d'énergie renouvelables aux réseaux de services publics a des effets néfastes sur la protection du système, ce qui nécessite de modifier la sélection et le réglage des dispositifs de protection. Les dispositifs EP ont résolu ce problème parce qu'ils peuvent répondre rapidement aux pannes provoquées par les ERs, et les rectifier instantanément avant d'avoir un impact sur le système de protection de réseau existant.
- L'utilisation d'un bus DC commun permet l'intégration de plusieurs SERs et de dispositifs de stockage, ce qui améliore la fiabilité du réseau.
- Une propriété importante du SEH est la formation d'un MR. Pendant la formation de ce MR, SEH doit être capable de passer rapidement du mode autonome au mode connecté au réseau. Pour ce faire, une commutation extrêmement rapide est nécessaire, ce qui n'est possible que grâce aux périphériques électroniques de puissance [60].

Divers convertisseurs électroniques de puissance ont été développés pour intégrer les SERs et pour contrôler la puissance de la source vers la charge. Ces convertisseurs remplissent les fonctions suivantes [61] :

- Conversion des tensions d'entrée variables en tensions de sortie régulées.
- Garantir une puissance de sortie de haute qualité avec de faibles écarts de tension et de fréquence.
- Effectuer l'isolation électrique entre la source et la charge.
- Contrôle de la Puissance maximale dans les systèmes d'énergie éolienne et solaire.

De nombreux convertisseurs électroniques de puissance ont été présentés pour l'interface des ERs dans un système électrique hybride. Ces convertisseurs peuvent effectuer les opérations suivantes : AC à DC, DC à DC et DC à AC, et peuvent être classées en plusieurs groupes en tant que convertisseurs étage comme AC-AC, AC-DC, DC-DC et DC-AC ou convertisseurs multiple étage comme AC-DC-AC.

## Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

Ce chapitre présente la modélisation d'un système de source énergétique hybride formant un micro-réseau DC, constituant d'un panneau PV, de pile à combustible et d'une batterie de stockage. Le contrôle des convertisseurs d'interface de ces sources était effectué.

### 3.3 Modélisation et description du système

Comme était décrit dans le chapitre 2, les PV, Pile à combustible, et les batteries de stockage sont considérés comme des composants du MR DC, qui fournissent la puissance en régime permanent et transitoire requise par la charge. Les convertisseurs électroniques de puissance sont nécessaires pour connecter ces sources avec la barre de bus DC commun, et un onduleur basé sur IGBT avec un filtre L connecté pour les relier au réseau électrique principal comme présente la figure 3.1. La description du système étudié sera détaillée dans ce qui suit.

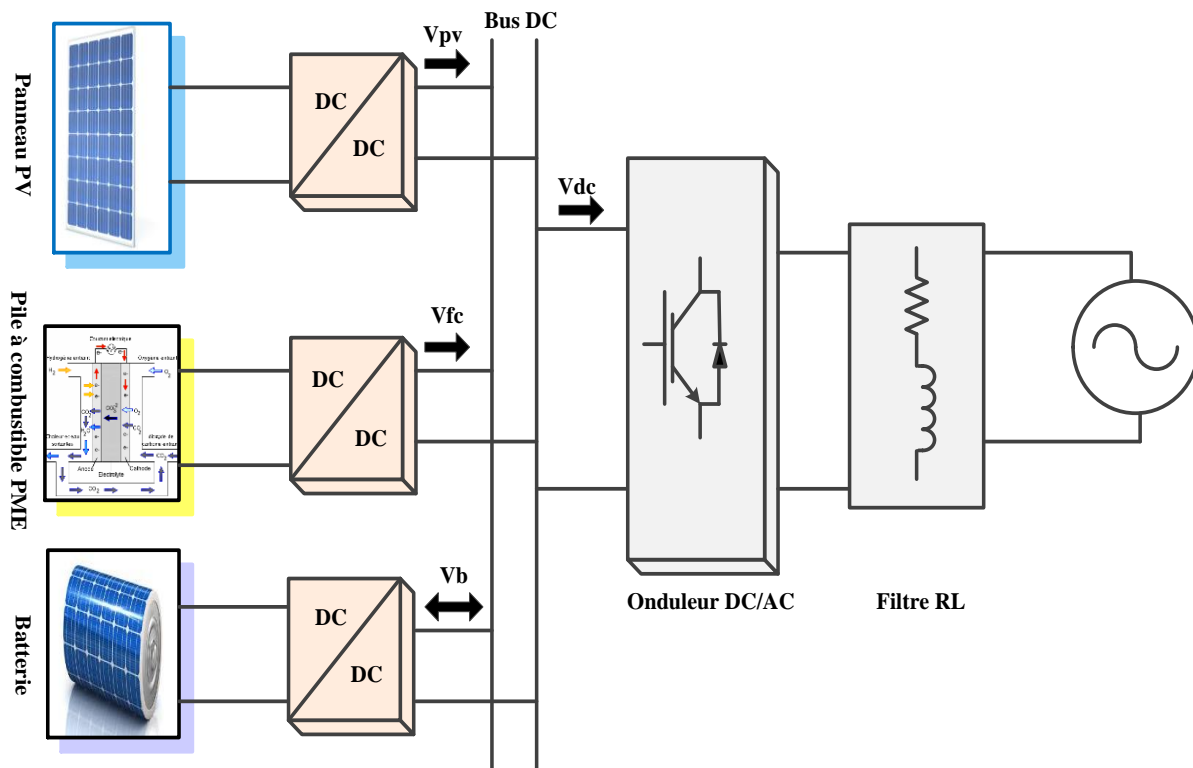


Figure.3.1 : Schéma de configuration de micro-réseau de type DC.

#### 3.3.1 Modèle de système photovoltaïque

Le but de la modélisation est d'entrer dans les performances du système PV en réponse aux changements climatiques, tel que le rayonnement et la température ambiante. Beaucoup des

### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

recherches ont été développées pour rendre les systèmes PV plus fiables. Le modèle utilisé ici est un modèle très connu.

La cellule PV est la partie de base de la génération du système PV. Il est basé sur le comportement statique d'une diode à jonction PN classique, en parallèle avec un générateur de courant continu et une résistance parallèle  $R_{sh}$  et une autre en série  $R_s$  [62].

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la figure 3.2. Ces composants représentent comme suit:

- Résistance série ( $R_s$ ) : Cette composante du circuit représente les pertes dues au contact électrique et à la résistivité du silicium.
- Résistance parallèle ( $R_p$ ) : Elle est associée aux pertes produites dans la jonction p-n.
- Courant de diode ( $I_d$ ) : Courant de diode lorsqu'il est polarisé en continu.
- Courant photovoltaïque ( $I_{pv}$ ) : C'est le courant généré par l'incidence de la lumière solaire sur la cellule photovoltaïque. Ceci est proportionnel à l'irradiation (éclairage) reçue sur la cellule.
- Courant généré ( $I$ ) : Courant existant à la sortie de la cellule photovoltaïque.

L'équation de base de la théorie des semi-conducteurs qui décrit mathématiquement la caractéristique I-V de la cellule PV idéale est la suivante [62]:

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{AV_t}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

Où  $A$  est le facteur de qualité de la diode et  $V_t = \frac{K_b T}{q}$  est la tension thermique; tandis que  $T$  est la température de la cellule (en K) et  $K_b, q$  sont la constante de Boltzmann et la charge électronique, respectivement.

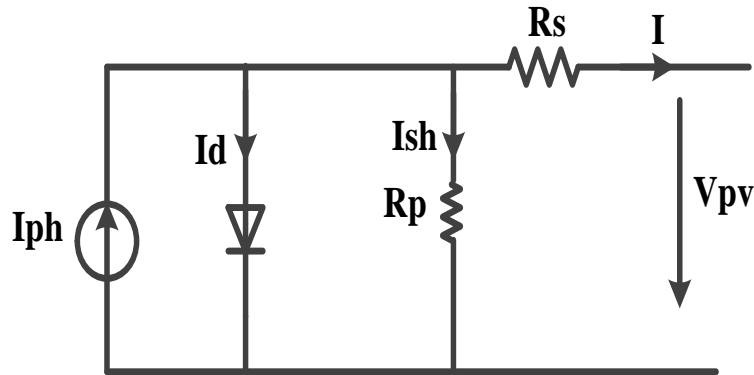
En général, lorsque le générateur PV est formé en utilisant des cellules connectées en série  $N_s$  et des cellules connectées en parallèle  $N_p$ , dans ce cas le modèle (3.1) devient :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[ \exp\left(\frac{N_p V + N_s R_s I}{N_p N_s A V_t}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

On s'intéresse dans ce travail aux panneaux solaires de type Kyocera **KC200GT**. Le tableau suivant illustre les données d'un panneau PV de 200W sous les conditions standard STC

### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

(Standard Test Condition) de  $1000 \text{ W/m}^2$  et  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les caractéristiques de ce panneau PV sont présentées sur la figure 3.3.

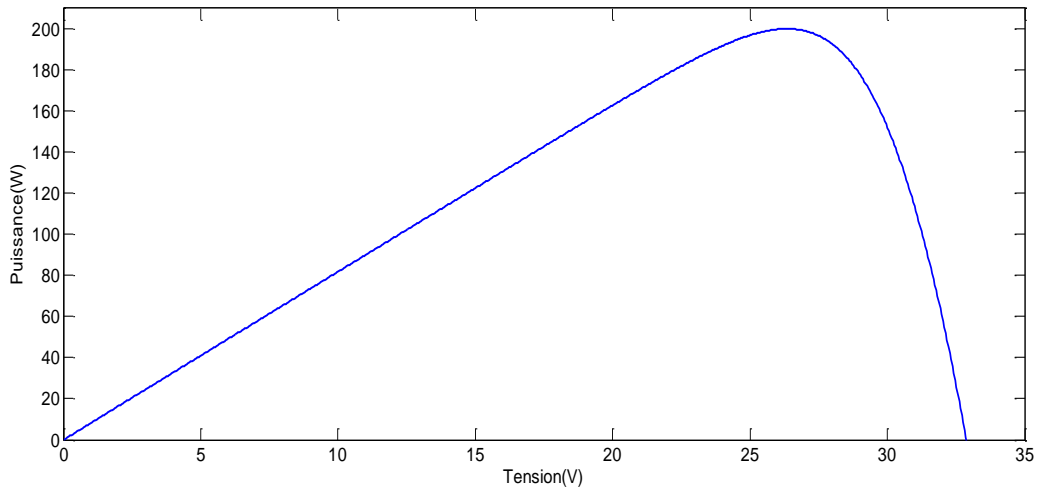


**Figure 3.2 : Modèle de circuit équivalent d'une cellule PV individuelle.**

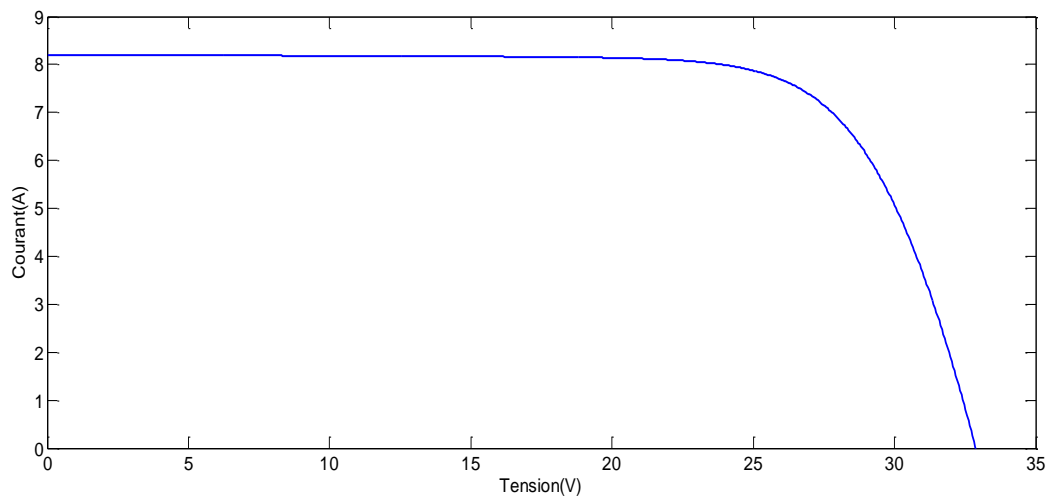
Paramètres	Values
L'éclairement solaire (irradiance Solaire)	$1000 \text{ W/m}^2$
Température de la cellule	298 K
Tension en circuit ouvert (Open circuit voltage) ( $V_{oc}$ )	32.9 V
Courant de court-circuit (Short circuit current) ( $I_{sc}$ )	8.21 A
Résistance série (Series resistance) ( $R_s$ )	$0.221 \Omega$
Résistance parallèle (Shunt resistance) ( $R_{sh}$ )	$415.405 \Omega$
Puissance maximale ( $M_{pp}$ )	200 W
courant de puissance maximale ( $I_{mpp}$ )	7.61 A
Tension d puissance maximale ( $V_{mpp}$ )	26.3 V
Nombre de cellules en séries par module ( $N_s$ )	54
q	$1.602 \times 10^{-23} \text{ C}$
$K_b$	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

**Tableau 3.1 : Paramètres du panneau PV (Kyocera KC200GT).**





**Figure 3.3 : Caractéristique puissance-tension de modèle PV.**



**Figure 3.4 : Caractéristique courant-tension de modèle PV.**

### 3.3.1.1 Commande de système PV

Comme était mentionné au chapitre précédent, la puissance maximale d'un panneau PV varie en fonction des variations des conditions atmosphériques comme les rayonnements solaire, température, l'ombrage (par rapport aux arbres et à la couverture nuageuse) et les conditions de charge [63]. Cependant, les conditions d'ensoleillement et de température sont les variables principales. Ainsi, les caractéristiques courant-tension (I-V) et les caractéristiques puissance-tension (P-V) des modules solaires sont affectées par les niveaux d'ensoleillement et de température. Le courant de sortie et donc la puissance de sortie augmentent linéairement avec l'ensoleillement tandis que la tension de sortie et donc la puissance de sortie diminue avec

### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

l'augmentation de la température. Ces deux variables environnementales changent constamment tout au long de la journée et, par conséquent, donnent lieu à l'intermittence et à la variabilité associées à la production d'énergie par modules solaires. Cela signifie qu'il y'a toujours une tension de terminaison optimale pour que le générateur PV puisse être fonctionné à chaque condition, pour obtenir la puissance maximale. Les convertisseurs DC/DC jouent un rôle important dans le processus de suivi de point de puissance maximale(MPPT); en connectant les bornes de sortie du réseau aux bornes d'entrée du convertisseur DC, la tension du réseau peut être contrôlé en faisant varier le rapport cyclique du convertisseur et la tension à laquelle la puissance maximale est peut être maintenue. Les techniques MPPT peuvent être classées en méthodes directes et indirectes [64]. Les méthodes indirectes, telle que celles se basant sur la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit [65], nécessitent une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV, ou sont basées sur les relations mathématiques qui ne répondent pas à toutes les conditions météorologiques. Par conséquent, elles ne peuvent pas suivre précisément la MPP de module PV à tout ensoleillement et température de la cellule. En outre, la détection directe de la température et de l'ensoleillement n'est pas conseillée, parce que leur mesure nécessite des dispositifs coûteux qui doivent être placés tout au long du panneau PV, afin d'obtenir les valeurs de telles variables pour chaque panneau ou groupe de panneaux, ce qui rend la mesure très coûteuse en particulier pour les grandes installations PV.

D'autre part, les méthodes directes fonctionnent sous toutes les conditions météorologiques. Parmi ces méthodes les plus utilisées sont : La méthode de perturbation et d'observation [66], la méthode de la conductance incrémentale (IncCond) [67], et la méthode MPPT à base de la logique floue (FL) [68]. Les méthodes P&O et IncCond permettent habituellement de contrôler le signal de référence de convertisseur DC/DC qui adapte la tension de module PV avec celle du bus continu ou fonctionne comme chargeur de batterie.

Les principaux avantages de ces deux dernières méthodes est qu'elles sont compatibles avec n'importe quel générateur PV, elles ne nécessitent pas d'informations sur le générateur, et sont simples à implémenter sur un contrôleur numérique. En plus, il est possible d'intégrer ces méthodes dans les onduleurs commerciaux [69]. En outre, les méthodes MPPT peuvent être classées en méthodes conventionnelles et méthodes intelligents ; qui sont les méthodes à base de la logique flou (FL) et les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont plus efficaces, parce qu'elles ont une réponse rapide, mais elles sont plus complexes par rapport aux techniques

## Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

classiques qui sont généralement simples, pas chers et moins efficaces. Bien qu'il existe plusieurs techniques MPPT ; on s'intéresse ici par l'algorithme de la conductance incrémentale (IncCond).

### 3.3.1.2 La méthode de la conductance incrémentale

L'algorithme IncCond a été mis au point pour améliorer la précision de poursuite dynamique et la performance de l'algorithme P&O dans des conditions d'irradiation en évolution rapide. Les avantages de cette méthode par rapport à l'algorithme P&O sont qu'il n'a pas besoin de perturber la tension si le gradient de  $\frac{dP}{dV}$  est nul et qu'il peut assurer que la direction de perturbation est correcte.

La tension et le courant du générateur PV sont les grandeurs sur lesquelles le contrôleur MPPT repose pour calculer la conductance incrémentale, et de prendre sa décision (pour augmenter ou diminuer le rapport cyclique de sortie). La puissance de sortie du générateur PV peut être exprimée comme :  $P = VI$ . La dérivée de ce produit donne :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (3.3.a)$$

Et par conséquent

$$I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (3.3.b)$$

Qui est l'idée de base de l'algorithme IncCond.

La figure 3.5 montre que la pente de la courbe de puissance du générateur PV est nulle à l'MPP, augmentant à gauche de l'MPP et diminuant à droite de l'MPP.

Les équations de base de cette méthode sont les suivantes [70] :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.4.a) \quad \text{Au MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (3.4.b) \quad \text{à gauche de MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (3.4.c) \quad \text{à droite de MPP}$$

Où  $I$  et  $V$  sont le courant et la tension de sortie du générateur PV, respectivement. À partir des équations (3.4.a)-(3.4.b), il est évident que lorsque le rapport de variation de la conductance de

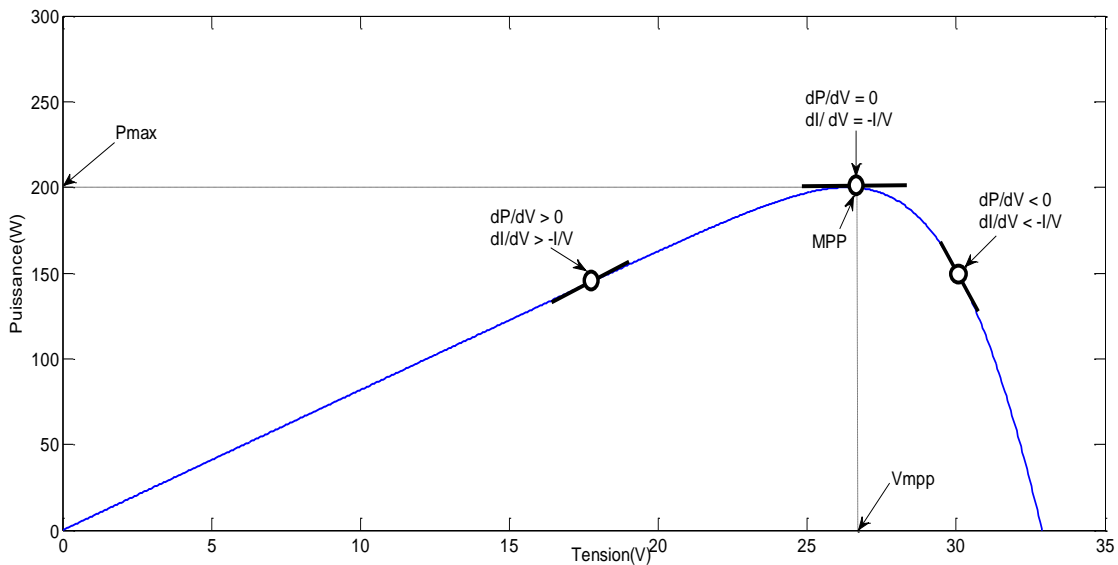
### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

sortie est égal à la conductance de sortie négative, le panneau solaire fonctionnera à l'MPP. L'organigramme de l'algorithme IncCond utilisant la méthode de contrôle directe est présenté sur la figure 3.7 les changements incrémentaux  $dV$  et  $dI$  peuvent être calculés numériquement en échantillonnant le courant  $I$  et la tension  $V$  du générateur PV à des intervalles du temps consécutifs  $(k - 1)$  et  $(k)$ , comme suit [71] :

$$dV = V(k) - V(k - 1) \quad (3.5.a)$$

$$dI = I(k) - I(k - 1) \quad (3.5.b)$$

Un point à mentionner que  $\frac{dP}{dV} = 0$  et  $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$  se produisent rarement dans la mise en œuvre pratique, et une petite erreur est habituellement permise [70]. L'importance de cette erreur tolérée ( $\epsilon$ ) détermine la sensibilité du système. Cette erreur est choisie en fonction de l'alternance entre les oscillations en régime permanent et le risque de fluctuation à un point de fonctionnement similaire.



**Figure 3.5 : Principe de la méthode IncCond.**

Il est suggéré de choisir un petit chiffre positif, (3.4.a) peut être réécrit comme suit :

$$I + V \frac{dI}{dV} = \epsilon \quad (3.6)$$

Selon l'algorithme MPPT, le rapport cyclique est calculé ; il s'agit du rapport souhaité que le module PV doive passer à l'étape suivante. Le réglage d'un nouveau cycle d'utilisation dans le

### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

Le système est répété en fonction du temps d'échantillonnage. La modulation à largeur d'impulsion (MLI, PWM) générée par le rapport cyclique est appliquée à IGBT/Diode pour le contrôler.

Lorsque l'on propose un suiveur MPP, il s'agit avant tout de choisir et de concevoir un convertisseur très efficace, qui est censé fonctionner comme la partie principale de l'MPPT. L'efficacité des convertisseurs DC-DC à découpage est largement discutée dans [72]. Le convertisseur élévateur (boost) était choisi pour l'implémenter grâce à son efficacité comme illustre la figure 3.6.

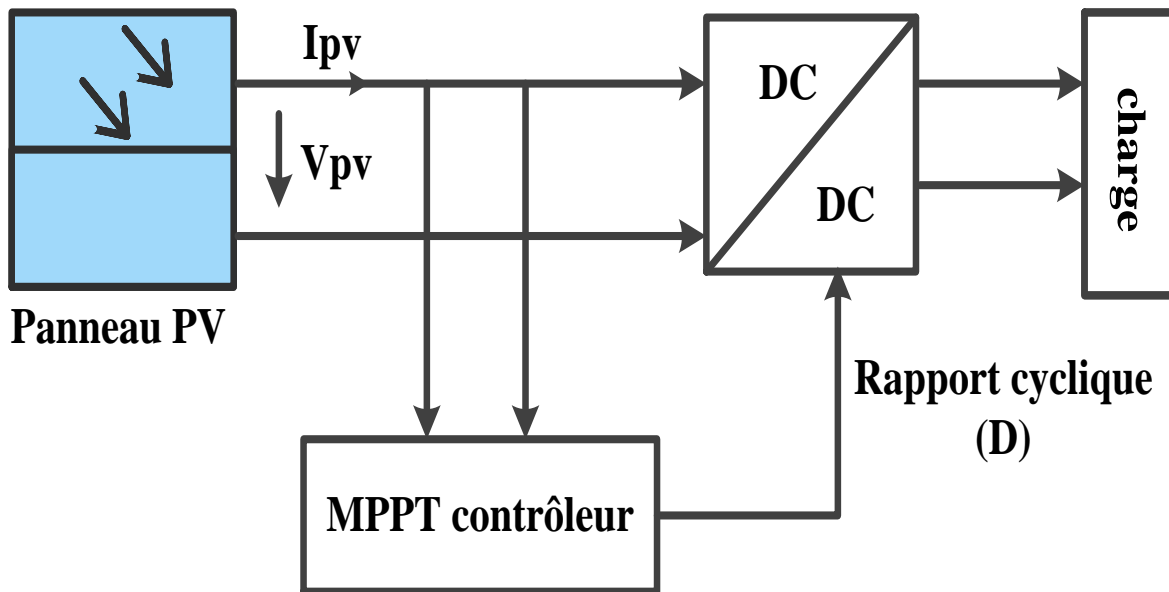


Figure 3.6 : Schéma de contrôle par convertisseur boost avec MPPT.

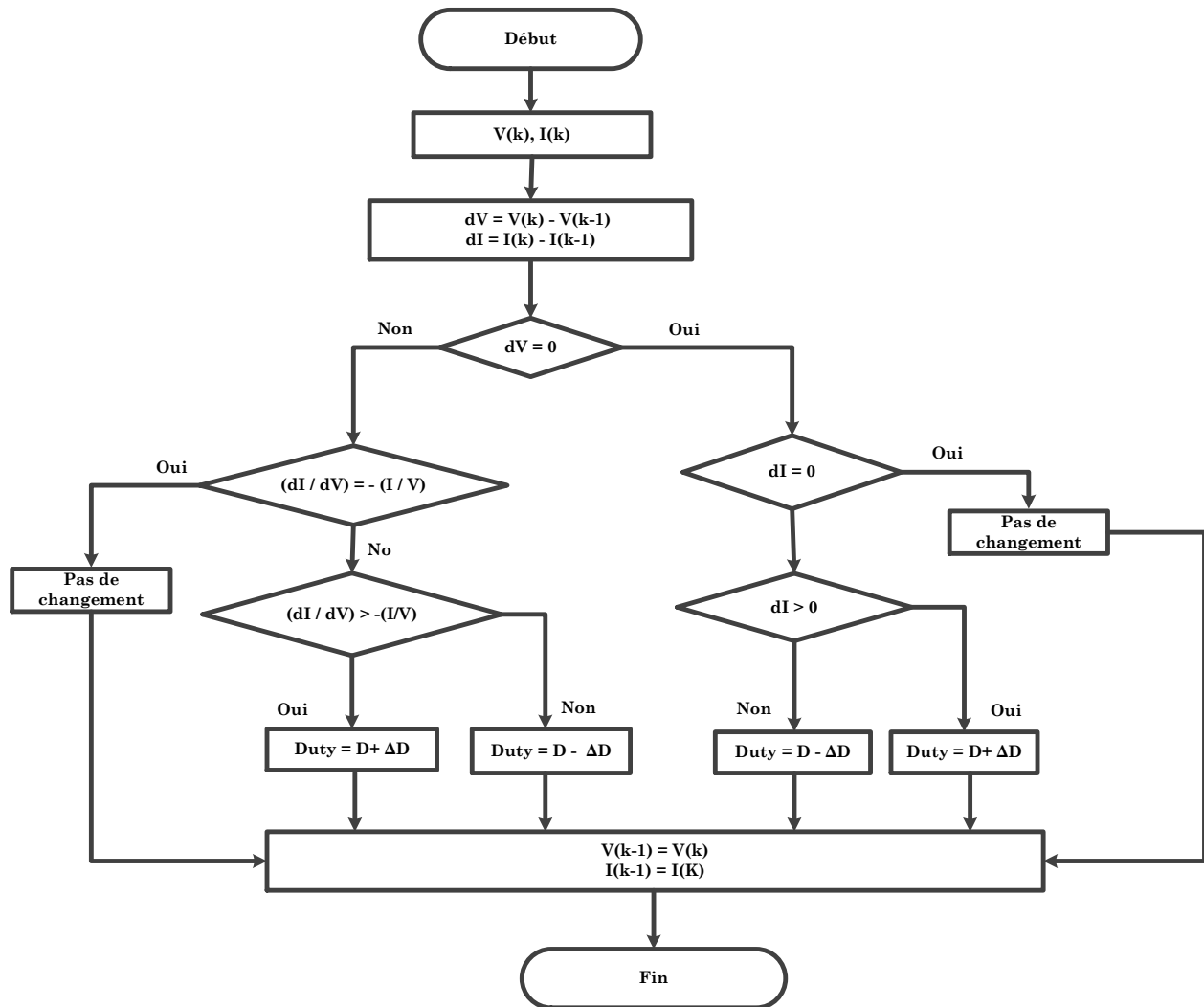
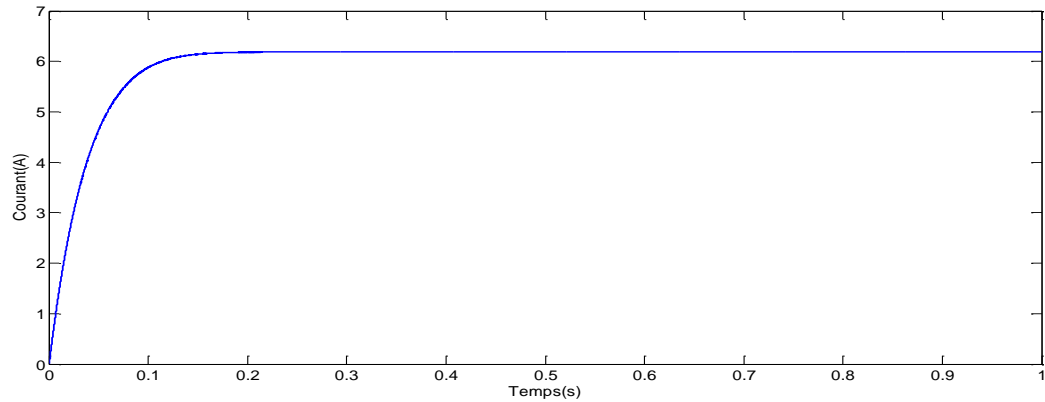


Figure 3.7 : Organigramme de l’algorithme conductance incrémentale (IncCond).

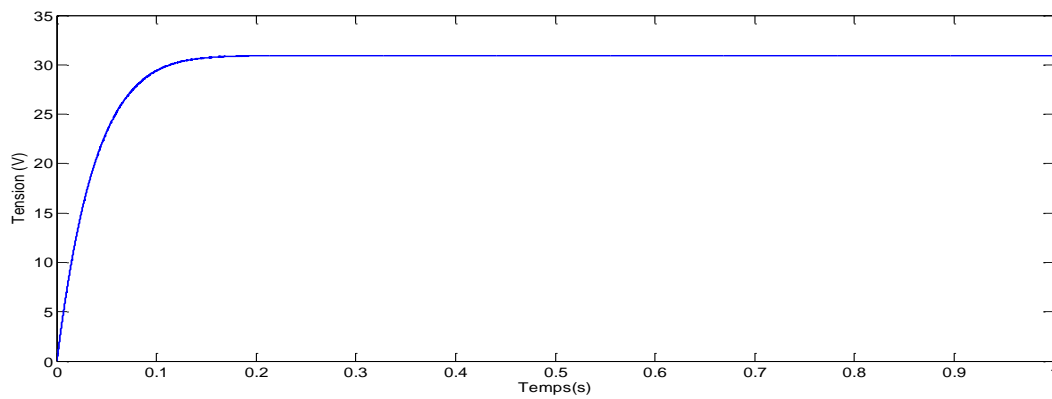
### 3.3.1.3 Résultats de simulation

L’implémentation de modèle PV était effectuée sous l’environnement Matlab/Simulink, les résultats de simulation sont montrés sur les figures 3.8, 3.9 et 3.10.

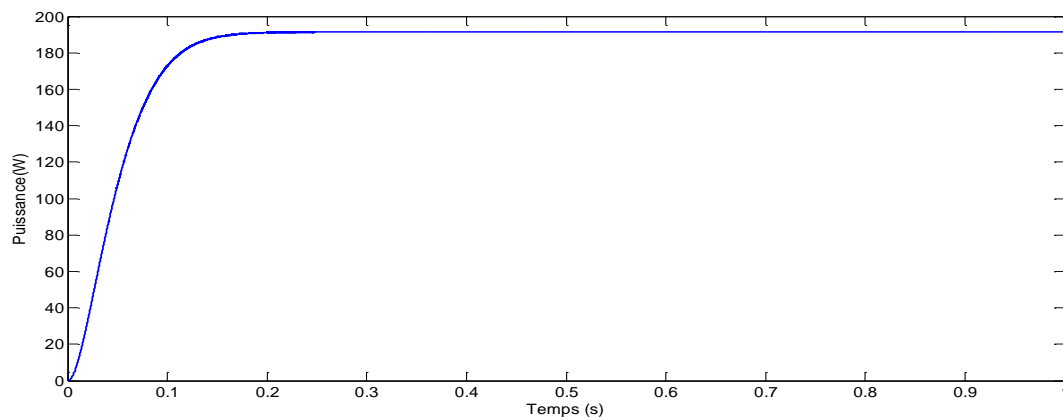
## Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux



**Figure 3.8 : Courant à la sortie de convertisseur avec le contrôle IncCond .**



**Figure 3.9 : Tension à la sortie de convertisseur avec le contrôle IncCond.**



**Figure 3.10 : Puissance à la sortie de convertisseur avec le contrôle IncCond .**

Comme montrent les figures ; l'algorithme IncCond a une bonne extraction de la puissance maximale sous les conditions Standards.

### 3.3.2 Modélisation et contrôle de la pile à combustible PEM

### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

Comme on a mentionné dans le chapitre précédent, de nombreuses sources d'énergies renouvelables ont été développées ces dernières décennies, telle que : les énergies solaire, les éoliennes, et les énergies hydrauliques.

Néanmoins, toutes les sources susmentionnées sont indépendantes des changements climatiques qui peuvent perturber les performances de ces sources. D'autre part, afin de résoudre la limitation, un dispositif appelé pile à combustible est introduit ; Qui utilisent de l'hydrogène ( $H_2$ ) et de l'oxygène ( $O_2$ ) qui sont des sources durables combustibles pour le système afin de créer l'énergie.

Comme le FC utilise deux électrodes (anode et cathode), sa construction est similaire à celle de la batterie. Le principal avantage de FC par rapport aux batteries est sa capacité à fournir de l'énergie en courant continu tant que du carburant hydrogène est fourni. Cependant, dans le FC, une chute de tension interne plus importante est induite ; ceci est dû aux pertes d'activation, aux pertes ohmiques et aux pertes de concentration [73], en raison des processus chimiques locaux impliqués. Les figures 3.11.a et 3.11.b présentent le circuit équivalent de la pile à combustible et la caractéristique V-I d'une cellule unique de FC illustre l'effet de ces pertes. Les pertes d'activation sont dues à la lenteur de la réaction électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène en raison de la cinétique de l'électrode, ceci crée une chute de tension non linéaire à faibles densités du courant, comme on peut le voir sur la figure 3.11.b.

Les pertes ohmiques proviennent du flux d'électrons à travers l'électrolyte et les électrodes. Contrairement aux pertes d'activation qui sont non linéaires, les pertes ohmiques sont essentiellement linéaires et sont directement proportionnelles à la densité du courant. Les pertes de concentration résultent de l'incapacité du matériau environnant à maintenir la concentration initiale du combustible à des courants élevés [74].

La modélisation de la pile à combustible PEM est basée sur les équations de conception suivantes [75]. Pertes d'activation, pertes de concentration et pertes Ohmiques sont les trois principales pertes qui se produisent pratiquement à partir de la pile à combustible et que l'on peut observer à l'aide de ce modèle à l'état d'équilibre.

$$V_{cell} = E - V_{act} - V_{conc} - V_{ohmic} \quad (3.7.a)$$

Où :



### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

$E$  : Tension réversible.

$V_{act}$ : Tension d'activation.

$V_{conc}$ : Tension de concentration.

$V_{ohmic}$ : Tension ohmique.

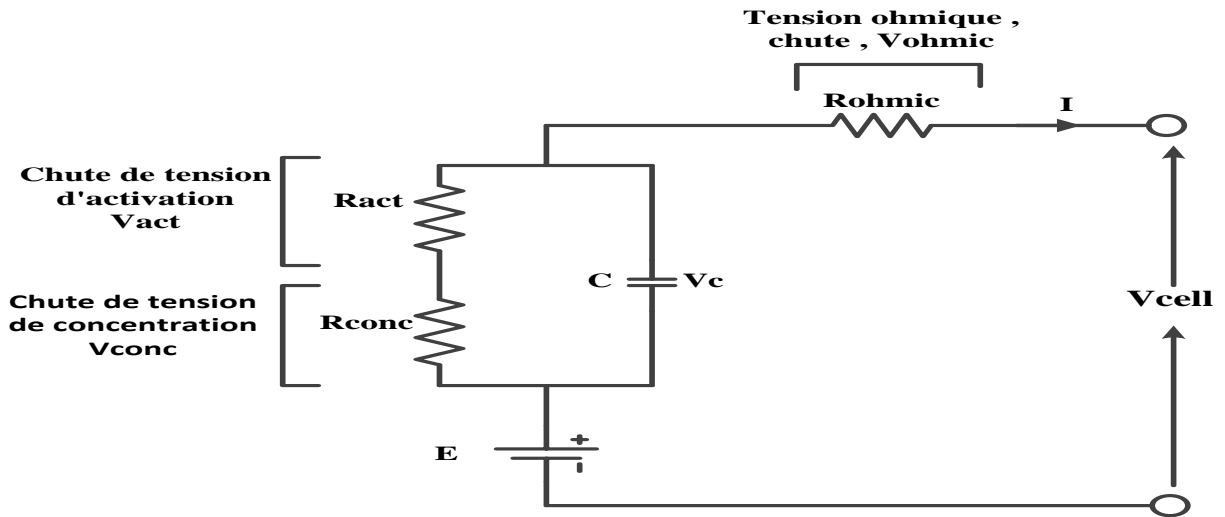


Figure 3.11.b : Circuit électrique équivalent de la pile à combustible.

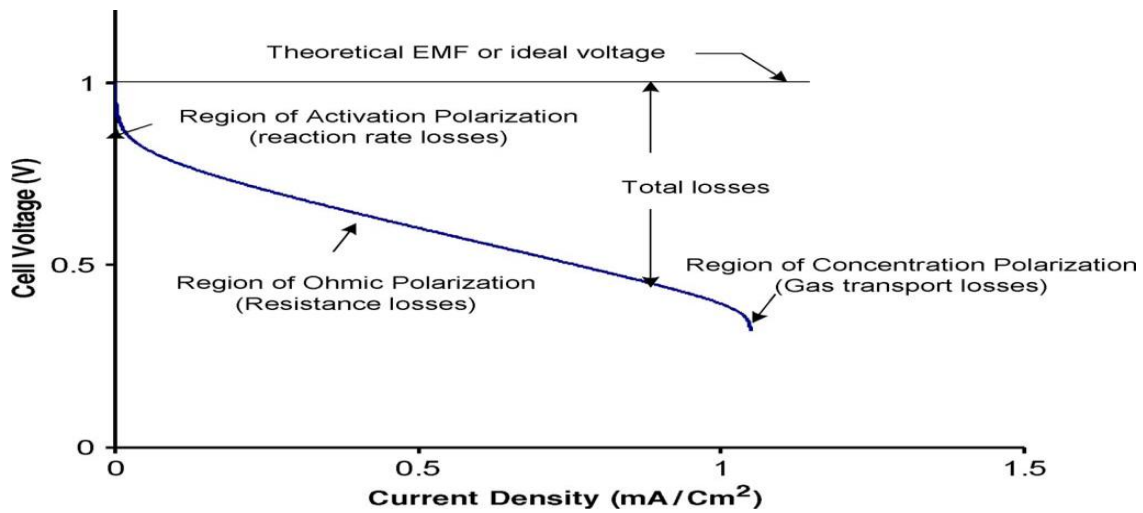


Figure 3.11.b : V-I caractéristique de pile à combustible [76].

La tension de sortie de la pile à combustible peut être obtenue :

$$V_{out} = N_{cell}V_{cell} = E - V_{act} - V_{conc} - V_{ohmic} \quad (3.7.b)$$

### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

Pour calculer la tension de sortie de la pile à combustible les estimations suivantes sont utilisées :

- Perte de tension d'activation : elle est due à la cinétique de l'électrode. lors de réactions électrochimiques, il y a une chute de tension afin de fournir un courant continu en donnant l'énergie d'activation nécessaire. l'équation donnée ci-dessous est utilisée pour calculer la perte de tension d'activation dans la pile à combustible.

Une équation empirique pour  $V_{act}$  est donnée dans [77] :

$$V_{act} = \eta_o + (T - 298).a + T.b \ln(I) = V_{act1} + V_{act2} \quad (3.7.c)$$

Où  $V_{act1} = (\eta_o + (T - 298).a)$  est la perte de tension affectée uniquement par la température interne de la pile à combustible, bien que  $V_{act2} = (T.b \ln(I))$  dépend à la fois du courant et de la température.

- Perte de tension ohmique : à courant moyen, les pertes ohmiques provoquent des pertes de tension dues à la résistance ionique de l'électrolyte et à la résistance électronique des électrodes. la perte de tension ohmique globale peut être exprimée comme suit :

$$V_{ohm} = IR_{ohm} \quad (3.8)$$

Où  $R_{ohm}$  est la résistance ionique dans l'électrolyte et la résistance électronique dans les électrodes.

- Perte de tension de concentration : En cas de courants élevés, la concentration de tension devient plus importante. Pendant le processus de réaction, des gradients de concentration peuvent se former en raison des diffusions de masse des canaux d'écoulement vers les sites de réaction (surfaces de catalyseur). le sur potentiel de concentration dans la pile à combustible est défini comme suit :

$$V_{conc} = -\frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_s}{C_B} \quad (3.9)$$

$C_s$  est la concentration en surface,  $C_B$  est la concentration apparente.

Dans ce travail on a utilisé la Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (Proton exchange membrane Fuel cell) (PEMFC) de type (PEMFC 6KW-45V<sub>dc</sub>) développée sous

## Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

Simpower system de Matlab/Simulink comme un générateur de puissance de type renouvelable. La figure 3.13 présente les caractéristiques de la pile à combustible.

Le FC est connecté à la liaison DC par l'intermédiaire de convertisseur boost comme montre la figure 3.12 un contrôleur PI en double boucle est mis en œuvre pour contrôler le courant et la tension et génère un rapport cyclique D pour augmenter la tension de la pile à combustible par rapport à la tension de liaison DC comme montre les figures 3.12 et 3.13. La relation de rapport cyclique est donnée par :  $D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$ .

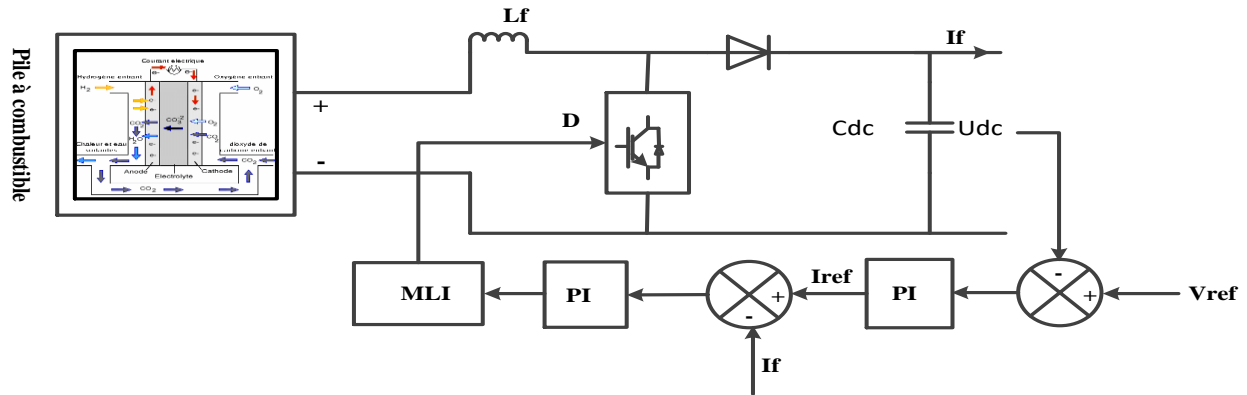


Figure 3.12 : Pile à combustible avec le convertisseur boost.

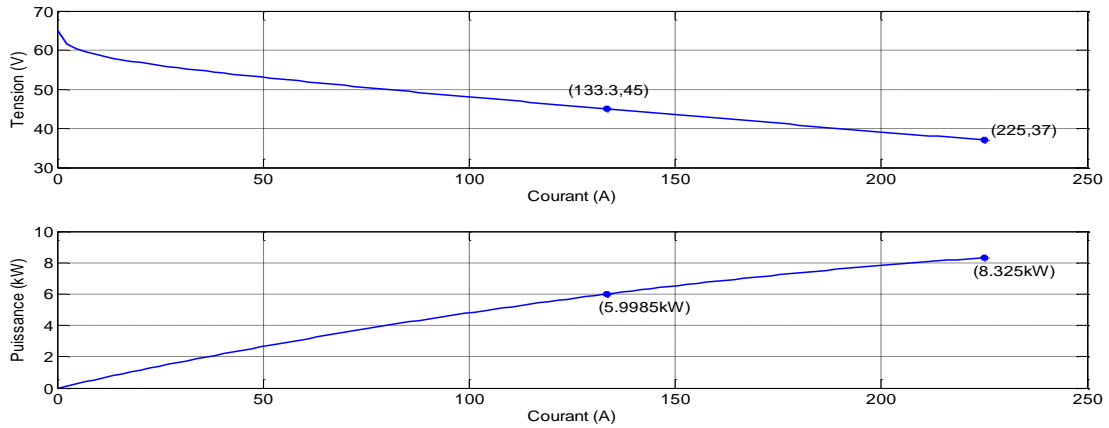
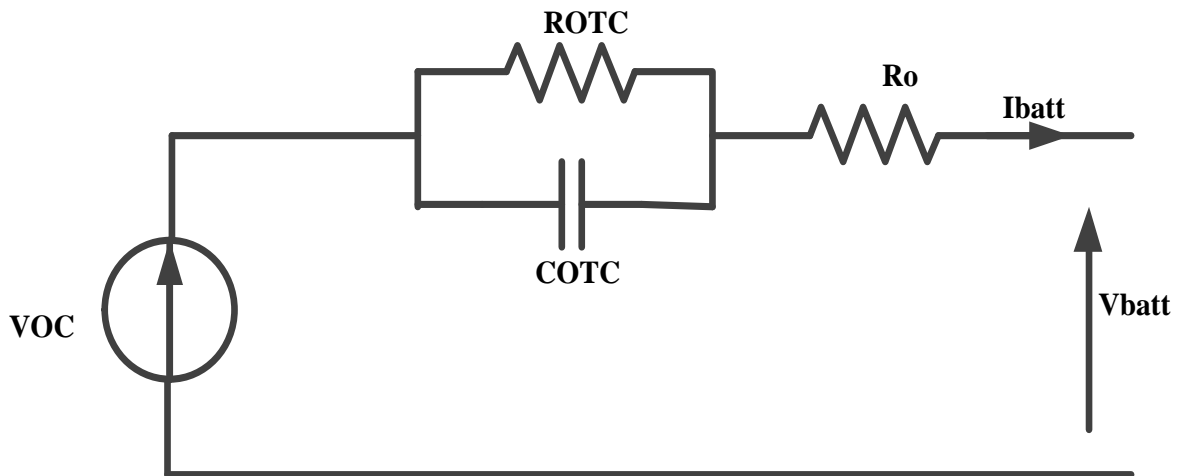


Figure 3.13 : Caractéristique de la pile à combustible.

### 3.3.3 Batterie de stockage

Le système de stockage est composé d'une Lithium-Ion (Li-ion) batterie, son circuit équivalent est présenté sur la figure 3.14, un convertisseur bidirectionnel DC/DC est relié avec son système

de contrôle. Le système doit pouvoir fonctionner dans les deux sens : La batterie peut être chargée pour stocker l'énergie supplémentaire et aussi décharger l'énergie.



**Figure 3.14 : Circuit équivalent de Li-Ion batterie [78].**

Dans notre travail ; la batterie est connectée au bus DC via le convertisseur bidirectionnel DC/DC. L'objectif principal du convertisseur de batterie est de maintenir la tension de liaison DC constante. C'est pour cette raison, peu important que la batterie soit en train de se charger ou de se décharger, la tension du bus DC peut être stable et donc l'ondulation de la tension de condensateur est beaucoup moins importante. Pendant le chargement de la batterie, le commutateur  $S_1$  est activé et le convertisseur fonctionne comme élévateur (boost) ; autrement, lors de la décharge, le commutateur  $S_2$  est activé et le convertisseur fonctionne comme un circuit dévolteur (buck). Figure 3.15 présente la méthode de contrôle de circuit bidirectionnel. Le schéma de contrôle inclus deux boucles : une boucle externe pour le contrôle de tension et une boucle interne pour le contrôle du courant. Lorsque la tension à la liaison DC est inférieure à la référence de tension, le commutateur  $S_2$  est activé, et quand la tension à la liaison DC est supérieure à celle de référence, le commutateur  $S_1$  est activé. La figure 3.16 présente les caractéristiques typiques de la décharge de Li-Ion batterie.

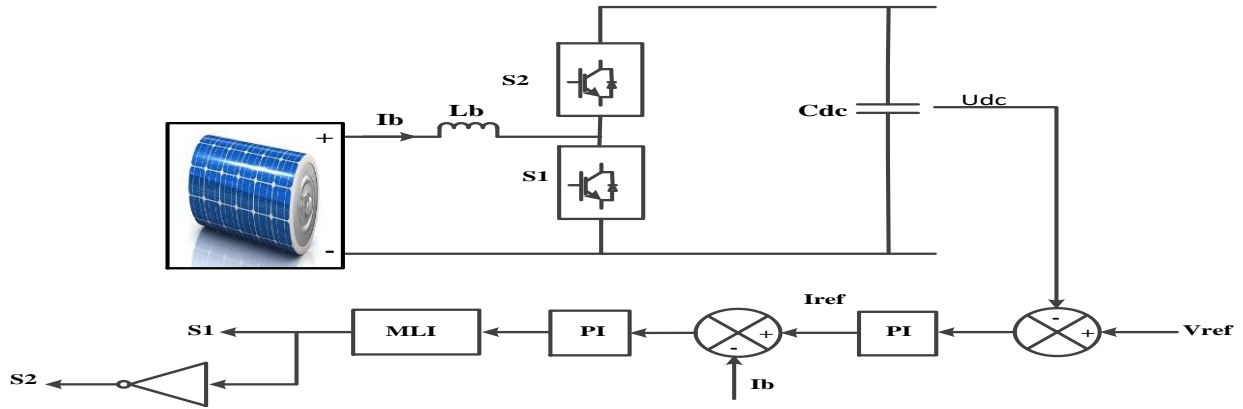


Figure 3.15 : Batterie de stockage avec le convertisseur bidirectionnel.

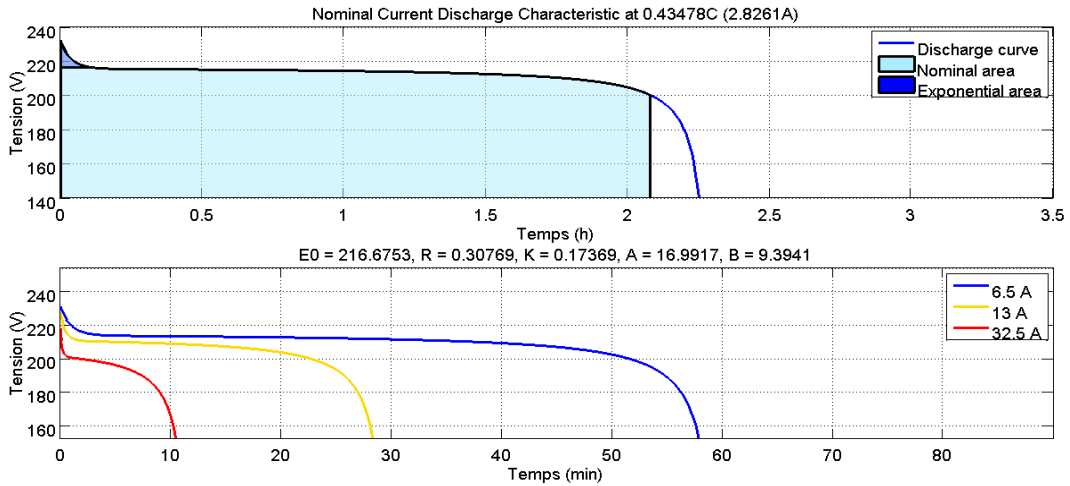


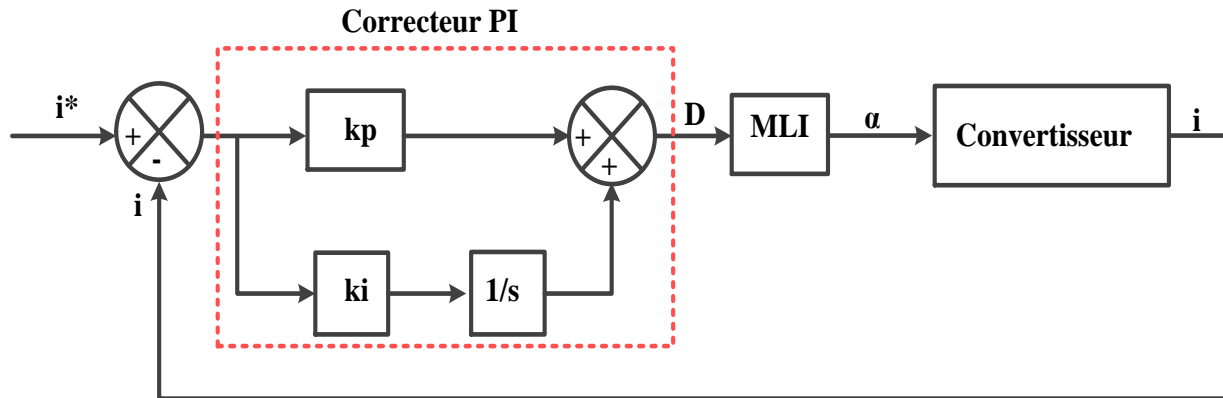
Figure 3.16 : Caractéristiques de décharge typiques de la batterie.

### 3.3.4 Principe de la commande MLI pour les convertisseurs DC/DC

La commande MLI est utilisée pour commander quasiment tous les convertisseurs à découpage. Elle nécessite encore des correcteurs (en boucle fermée) afin de contrôler les flux de puissances et de garder la balance des puissances instantanées. Le contrôle à boucle fermée couplée avec un correcteur proportionnel-intégral (PI) est généralement appliqué par l'industrie pour réaliser le contrôle rapide et précis du système électrique. Une boucle du courant avec un correcteur PI est utilisée sur la figure 3.17, on peut voir que la différence entre la référence de courant  $i^*$  et le courant mesuré  $i$  devient l'entrée de correcteur PI. Le gain proportionnel  $k_p$  détermine la vitesse de convergence vers la référence et le composant intégral  $k_i$  annule l'erreur statique. La somme des résultats proportionnel et intégral est un rapport cyclique, noté  $D$ , compris entre 0 et 1. Puis, ce rapport cyclique va entrer dans la commande MLI dont la sortie est une série de commande

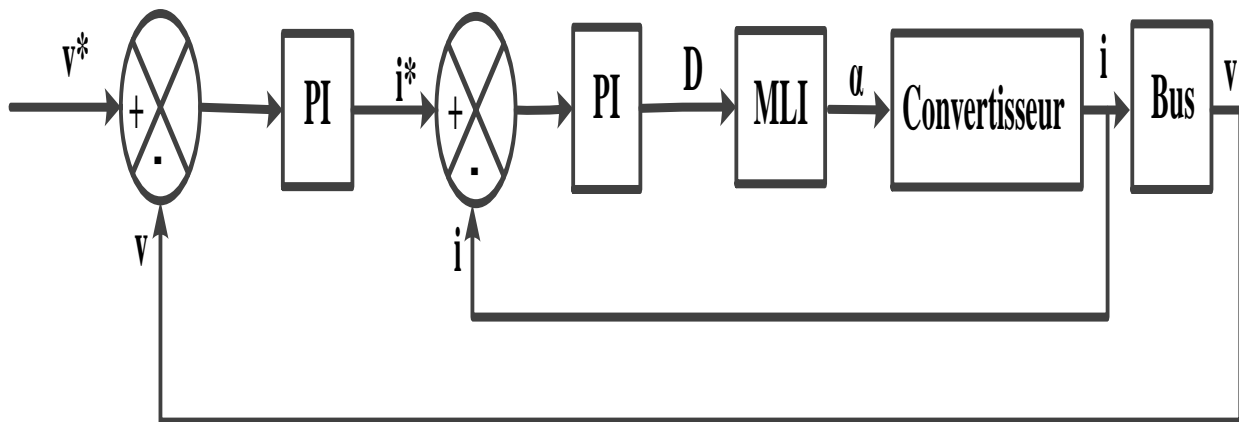
### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

binaire, noté  $\alpha$ , en respectant le rapport cyclique. Enfin, cette commande pilote le convertisseur physique pour générer le courant désiré noté  $i$ . Le digramme de la figure 3.18 présente le principe de cette commande.



**Figure 3.17 : Boucle fermée de contrôle du courant avec un correcteur PI.**

Pour équilibrer les puissances et garder la tension de bus stable, une boucle de tension est aussi nécessaire. La figure 3.18 montre le contrôle à double boucle générale utilisée dans ce travail. La boucle intérieure reste identique à celle présentée précédemment, mais une boucle extérieure est rajoutée pour donner la référence du courant  $i^*$  à partir de la référence de tension  $v^*$  et de la tension mesurée  $v$  en mettant un autre correcteur PI.



**Figure 3.18 : Contrôle de tension à double boucle.**

Le convertisseur boost peut être modélisé comme un système du 1<sup>er</sup> ordre. Si le convertisseur PI classique utilisé pour contrôler le convertisseur boost, la fonction de transfert du système complet consistera en deux pôles et un zéro. Le zéro pourra causer l'instabilité, il est donc à éviter. Une

## Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

méthode couramment utilisée est la compensation pole-zéro. En changeant les paramètres  $k_p$  et  $k_I$ , on peut placer un pôle à la place du zéro; alors, l'effet du pole et celui du zéro seront annulés. Toutes fois cette méthode requiert la connaissance des paramètres du convertisseur, comme la résistance, l'inductance, peut varier selon le point de fonctionnement, la variation des paramètres peut faire échouer la compensation et provoquer l'instabilité.

### 3.3.5 Contrôle de l'onduleur raccordé au réseau

Le MR est connecté au réseau principal via un onduleur commun DC/AC et un filtre L. L'onduleur est contrôlé avec une commande MLI, celle-ci va comparer les courants de sorties (obtenus avec le contrôle de l'erreur entre les courants de référence et les courants de sortie) à des signaux triangulaires (dans le bloc three-phase-carrier). Nous avons réalisé cette fonction sous Simulink en comparant les trois courants de références avec trois signaux triangulaires comme montre les figures 3.19. La fréquence de ces signaux triangulaires va influencer sur la fréquence de commutation de l'onduleur et donc sur la qualité des signaux de sortie.

La stratégie de contrôle consiste principalement en deux boucles en cascade : une boucle de tension externe et une boucle interne du courant.

### 3.3.6 Contrôle de l'état de charge de Li-Ion batterie

Pour prédire l'état de la batterie, il est généralement exprimé comme le rapport de la capacité disponible. Nombreuse méthodes ont été développées pour estimer l'état de charge de la batterie, comme le filtre de Kalman étendu [79], et la méthode coulomb counting [80] ; cette dernière est utilisée dans notre étude.

#### 3.3.6.1 Principe de la méthode Coulomb counting

Cette méthode intègre le courant sur une période du temps donnée pour estimer l'état de charge (SOC). Elle est très rapide et dépende entièrement du courant de la batterie pour calculer le SOC. L'algorithme de la méthode est basé sur la formule suivante :

$$Soc(t) = SOC(0) - \frac{1}{Ah_{nom}} \int I_m(t) dt \quad (3.10)$$

Où,  $SOC(0)$  est la valeur initiale de l'état de charge de batterie,  $I_m(t)$  est le courant de batterie. La figure 3.24 présente l'état de charge de LI-Ion batterie utilisée dans ce système.

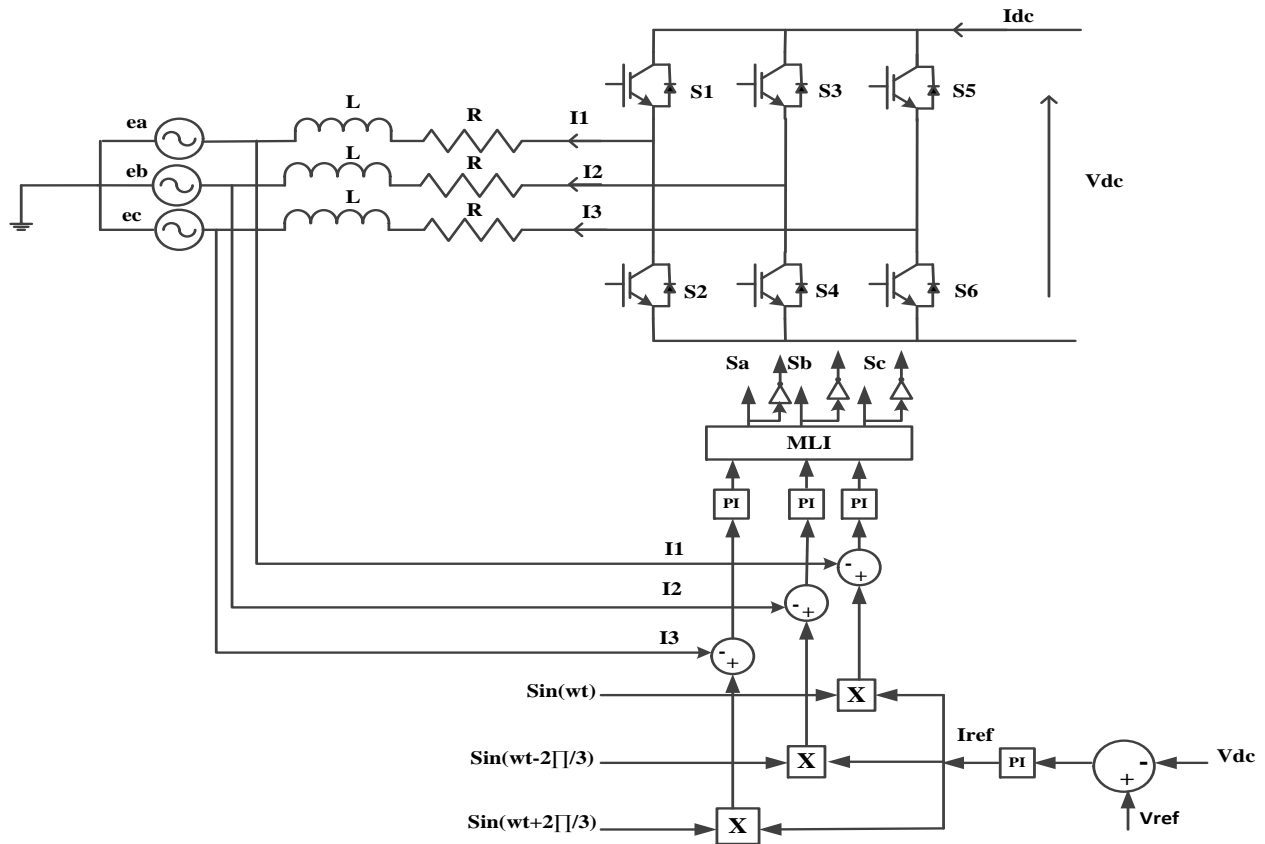


Figure 3.19 : Schéma fonctionnel de contrôle d'onduleur triphasé.

### 3.3.7 Analyse et résultats de simulation

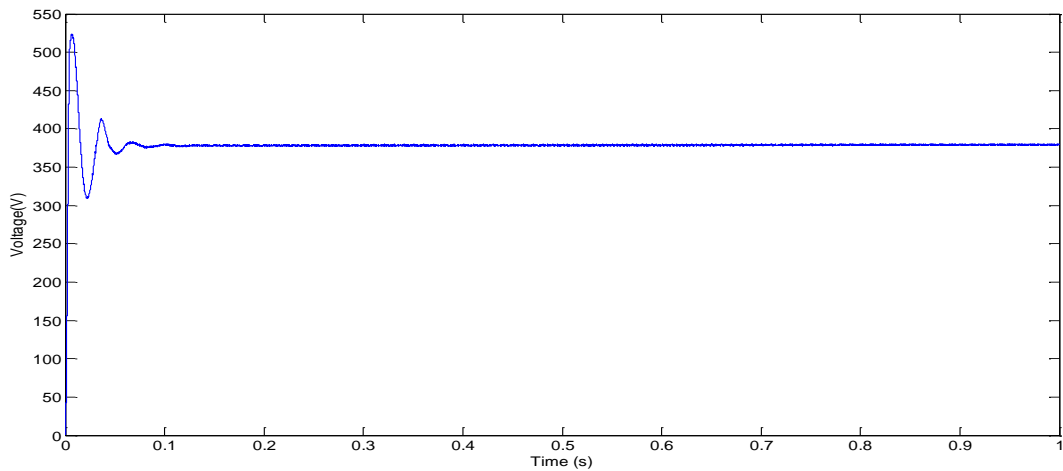
Le système MR est implémenté sous l'environnement Matlab/Simulink ; les paramètres de simulation sont présentés sur le tableau 3.2 et les résultats de simulation sont montrés sur les figures ci-après.



### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux

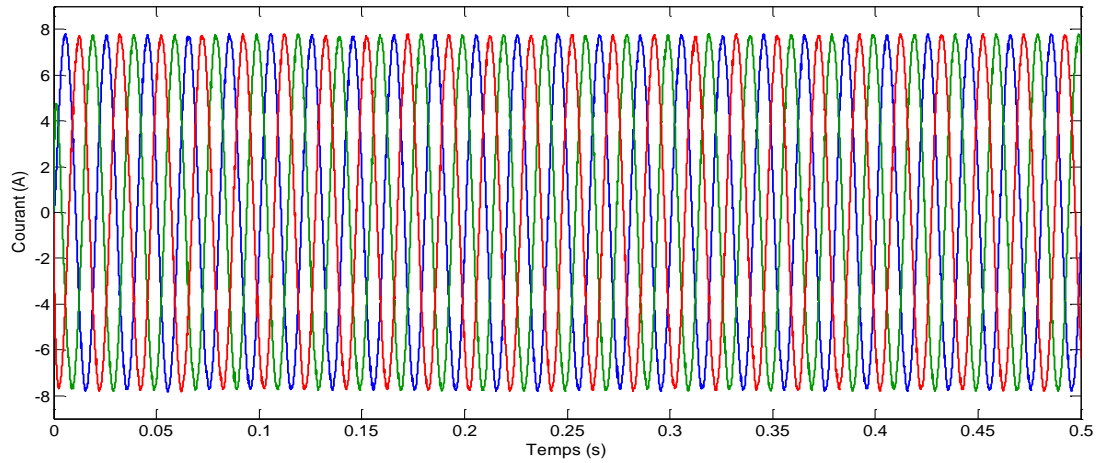
Paramètres	Valeurs
$V_{\text{nominal}}$ (batterie)	200V
Capacité nominale (batterie)	6.5 Ah
$L_b$ (inductance de boost)	2.5 mH
$C_b$ (capacité de boost)	50 $\mu$ F
Fréquence de signal triangulaire (MLI)	20KH
$L_{fc}$	3mH
$C_{fc}$	84 $\mu$ F
R	10 $\Omega$
$R_{\text{filter}}$	12.5 $\Omega$
$L_{\text{filter}}$	8mH
Tension de réseau/ Fréquence	100 V/50 Hz
Paramètres de régulateur PI	$K_p = 0.5$ ; $K_i = 0.002$

**Tableau 3.2 : paramètres de simulations.**

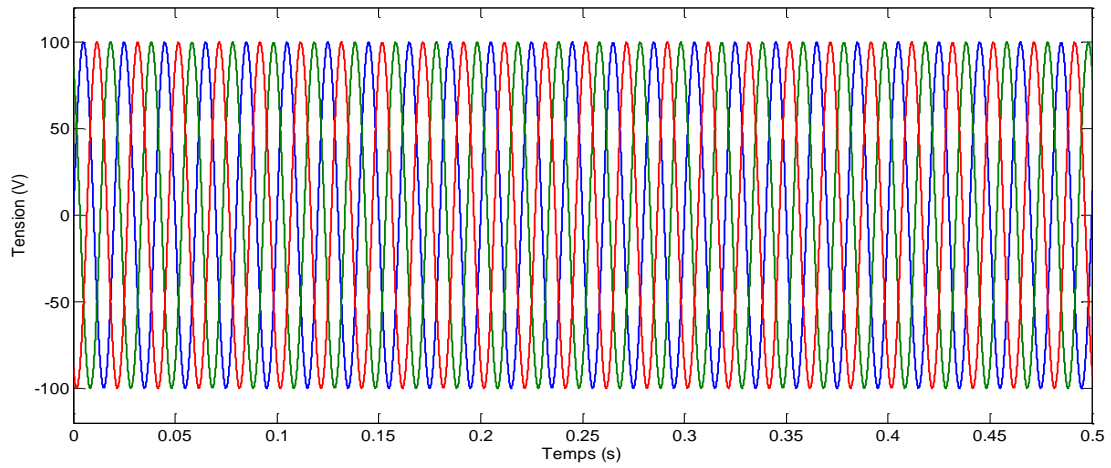


**Figure 3.20 : La tension à la liaison de bus DC commun.**

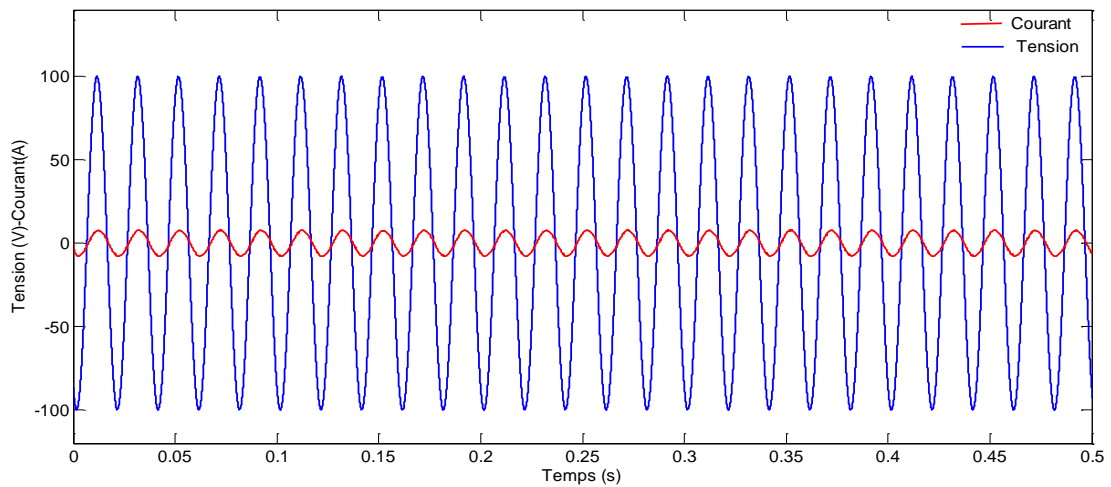
### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux



**Figure 3.21 : Le courant à la sortie de l'onduleur.**

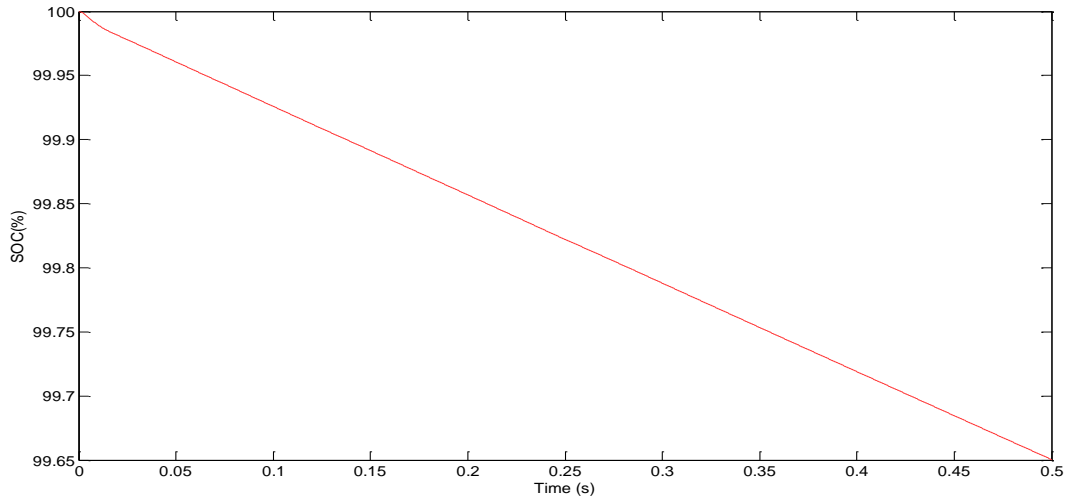


**Figure 3.22 : La tension à la sortie de l'onduleur.**



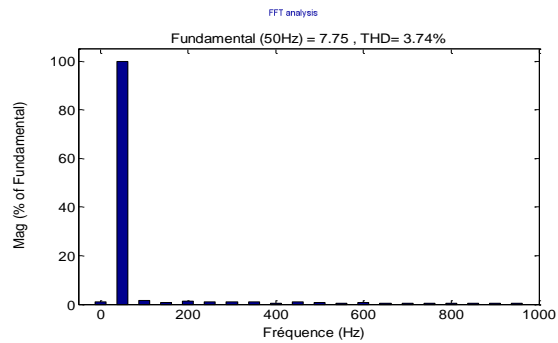
**Figure 3.23 : La tension et le courant à la sortie de l'onduleur.**

### Chapitre III. Contrôle des micro-réseaux



**Figure 3.24 : L'état de charge de la batterie.**

Les résultats de simulation montre que le système MR est assuré une tension continue constante au bus de liaison. On remarque que les tensions et les courants sont sous forme alternative et sinusoïdale. La synchronisation du réseau est assurée telle que la phase entre le courant et la tension est égale à zéro comme indiqué la figure 3.23 avec une faible distorsion harmonique (THD) ce qui montre l'efficacité de la méthode PI-MLI.



**Figure 3.25 : Distorsion harmonique total (THD)**

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié un système MR de type DC avec des sources d'énergie renouvelables hybride, qui contient un panneau PV, une pile à combustible et une batterie de stockage. Le contrôle des convertisseurs d'interface des SERs était effectué à l'aide de contrôleurs PI-MLI. La stratégie de contrôle de l'onduleur s'agit de la commande MLI avec un régulateur PI pour la régulation du courant de sortie. D'après les résultats de simulations, la technique PI-MLI améliore les performances du système. Ces améliorations affectent les performances du courant en ligne sinusoïdal et l'amélioration de la qualité d'alimentation.

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente une stratégie de contrôle prédictive pour les convertisseurs électroniques de puissance, en mettant l'accent sur les exigences de commande modernes. Le contrôle du courant est l'un des problèmes les plus étudiés dans les MRs, il est donc très important d'étudier dans un premier temps l'application de l'MPC dans le schéma de contrôle du courant en mode connecté au réseau principal.

### 4.2 Théorie de la commande prédictive

La théorie moderne du contrôle formulée dans le domaine temporel est apparue dans les années 1960 avec la théorie de filtre de Kalman et le régulateur quadratique linéaire [81]. La loi de contrôle du retour d'état de ce dernier est obtenue en minimisant une fonction objective (coût) sur un horizon infini, soumis à l'évolution dynamique d'un modèle de système linéaire. Les applications de la commande prédictive (MPC) dans l'industrie des procédés sont apparues dans les années 1970, en se concentrant sur les systèmes non-linéaires avec des contraintes physiques et sur une formulation à horizon fini.

Les raisons de l'adoption tardive de l'MPC par la communauté de l'électronique de puissance sont notamment les suivantes :

- La puissance de traitement limitée qui était disponible auparavant pour résoudre le problème de contrôle en temps réel et les constantes du temps très courtes des systèmes électroniques de puissance nécessitant l'utilisation de courts intervalles d'échantillonnages.
- La caractéristique non-linéaire des systèmes électroniques de puissance complique la conception, l'analyse et la vérification de contrôleur. Néanmoins, certaines études initiales sur les concepts liés aux MPC pour les convertisseurs de puissance ont été réalisées dans les années 1980. Plus important encore, ces méthodes ont été mises en œuvre avec succès et vérifiées expérimentalement [82].

Au cours de la dernière décennie, l'MPC est rapidement fait leur apparition dans le domaine de l'électronique de puissance; ces progrès ont été facilités non seulement par l'augmentation considérable de la capacité de calcul disponible dans le matériel de

## Chapitre IV. Commande prédictive

contrôleur, mais aussi par l'accélération tout aussi importante des valeurs qui calculent la solution au problème d'optimisation sous-jacent.

### 4.2.1 Problème de régulation

Soit un système général (électronique de puissance) avec un vecteur d'entrée  $u \in \mathcal{R}^{n_u}$  et un vecteur de sortie  $y \in \mathcal{R}^{n_y}$ , comme montre la figure 4.1 les deux vecteurs peuvent contenir des composantes à valeur réelle et des composantes à valeurs entières. Des contraintes physiques sous forme de limites d'actionneur existent généralement sur l'entrée [83]. Nous désignons l'entrée du système " $u$ " comme étant la variable manipulée, et la sortie du système " $y$ " comme grandeur de réglage. De plus, on désigne deux variétés du problème de contrôle. Lorsqu'un étage de modulation est ajouté au système, la variable manipulée est évaluée en valeur réelle et constitue généralement d'une référence de tension ; c'est ce que nous appelons le problème du contrôle indirect.

Le calcul de la moyenne peut être utilisé pour masquer le phénomène de commutation et l'utilisation de variables entières dans le modèle système peut être évitée. D'autre part, lorsque le modulateur est retiré, le problème de contrôle discret se pose, avec la variable manipulée correspondant aux positions des commutateurs du convertisseur. Par conséquent, le calcul de la moyenne ne peut pas être utilisé et le modèle du système contient des variables entières.

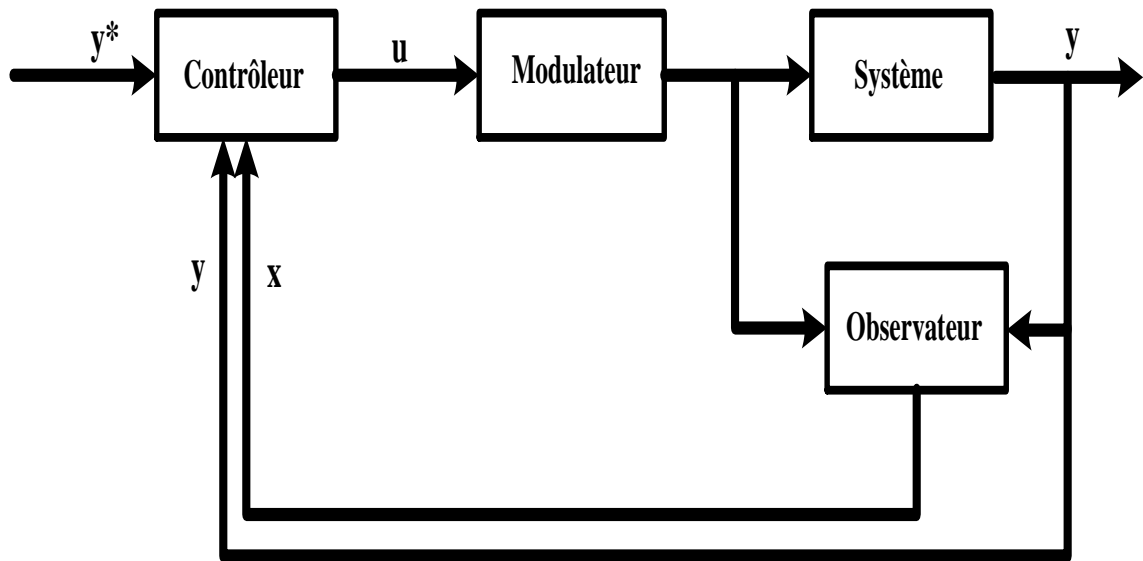


Figure 4.1 : Schéma descriptif de la loi de commande prédictive [83].

## Chapitre IV. Commande prédictive

En utilisant un modèle du système qui est alimenté par l'entrée du système, l'état de sortie du système peut être estimé ; en renvoyant la différence entre les résultats mesurés et les résultats estimés du système.

Les observateurs peuvent être conçus de telle sorte que les états estimés convergent vers les états réels à condition que l'observateur soit asymptotiquement stable et que le système soit observable.

Le problème général de contrôle consiste à concevoir un contrôleur qui atteint les objectifs de contrôle suivants :

- La sortie  $y$  du système doit être réglée selon sa référence  $y^*$  ; ceci peut être réalisé en renvoyant la sortie mesurée, en la comparant avec sa référence  $y^*$ , et manipuler l'entrée  $u$  en conséquence.
- Ce retour d'information de la sortie à l'entrée ferme la boucle et fournit la rétroaction.
- Le contrôleur doit également garantir la stabilité et veiller à ce que les contraintes soient respectées à tout moment (satisfaction des contraintes).

Ces trois objectifs doivent être atteints malgré les perturbations et les incertitudes du modèle, ce qui nécessite un certain degré de robustesse du contrôleur.

### 4.2.2 Principe de la commande

Au cours des dernières décennies, la commande prédictive a évolué à partir d'un ensemble de méthodes de contrôle à un paradigme de contrôle cohérent, peut être même à une philosophie de contrôle. Plusieurs articles ont été publiés sur l'MPC ; malgré les différentes formulations de variation de la commande, il y'a cinq clés communs au cadre de l'MPC peuvent être identifiés.

Ces caractéristiques sont résumées ci-dessous :

#### 4.2.2.1 Modèle dynamique interne

La commande MPC intègre un modèle dynamique du système à contrôler. Soit  $x \in \mathcal{R}^{n_x}$  désigne le vecteur d'état du système, qui est en général comprend des composantes à valeur réelle et des composantes entières.

## Chapitre IV. Commande prédictive

Partons de l'état actuel, le modèle dynamique interne permet à l'MPC de prédire la séquence des futurs états et sorties du système pour une séquence donnée de variables manipulées.

L'évolution dynamique du système peut être décrite dans le domaine du temps continu par la représentation de l'espace d'état :

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t)) \quad (4.1.a)$$

$$y(t) = h(x(t), u(t)) \quad (4.1.b)$$

D'où (4.1.a) est une équation différentielle non-linéaire du premier ordre qui capte l'évolution de vecteur d'état  $x$  au cours du temps  $t \in \mathcal{R}$ .

Les sorties  $y$  sont des fonctions non-linéaires  $h(.,.)$  des vecteurs d'entrées et d'états.

En électronique de puissance, lorsqu'on choisit des tensions, des courants comme variables d'état et de sortie, la représentation de l'espace d'état (4.1) est généralement linéaire et nous pouvons l'écrire sous la forme matricielle comme suit :

$$\frac{d x(t)}{dt} = F x(t) + G u(t) \quad (4.2.a)$$

$$y(t) = C x(t) \quad (4.2.b)$$

Où  $F$  est la matrice du système,  $G$  est la matrice d'entrée, et la matrice de sortie est représentée par  $C$ .

La plupart des stratégies MPC linéaires sont formulées dans le domaine du temps discret, en utilisant un intervalle d'échantillonnage constant  $T_s$ . La variable manipulée ne peut changer sa valeur qu'aux instants d'échantillonnage discrets, c-à-d qu'à l'instant actuel  $t = kT_s$ , où  $k \in \mathbb{N} = \{0,1,2, \dots\}$  indique les pas du temps.

Pour le modèle d'espace d'état en temps continu (4), la représentation en temps discret peut facilement être calculée ; en intégrant (4.2) à partir de  $t = kT_s$  jusqu'à  $t = (k + 1)T_s$  et observant que  $u(t)$  est constante pendant cet intervalle du temps et égale à  $u(k)$ , on obtient l'équation d'espace d'état en temps discret.

$$x(k + 1) = A x(k) + B u(k) \quad (4.3.a)$$



## Chapitre IV. Commande prédictive

$$y(k) = C x(k) \quad (4.3.b)$$

Les matrices  $A$  et  $B$  peuvent être calculées à partir de leurs équivalents en temps continu selon :

$$A = e^{FT_s} \text{ et } FB = -(I - A)G \quad (4.4)$$

Où  $e$  représente la matrice exponentielle, et  $I$  est la matrice d'identité à des dimensions appropriées.

Si les exponentielles de la matrice devient poser des différentes de calcul, l'approximation d'Euler est souvent suffisamment précise pour de courts intervalles d'échantillonnage allant jusqu'à plusieurs dizaines de microsecondes en combinaison avec de court horizon de prévision.

Dans ce cas, les matrices du système à temps discret sont données par :

$$A = I + FT_s \text{ et } B = GT_s \quad (4.5)$$

La matrice  $C$  est la même lors de la dérivation de la représentation du système en temps discret.

### 4.2.2.2 Contraintes

Même dans les cas où les équations de l'espace d'état sont linéaires comme dans (4.3), les contraintes sur les entrées, les états et les sorties sont généralement présentent, ce qui rend le système non linéaire.

$$u(k) \in U \subseteq \mathcal{R}^{n_u} \quad (4.6.1)$$

$$y(k) \in Y \subseteq \mathcal{R}^{n_y} \quad (4.6.2)$$

$$x(k) \in X \subseteq \mathcal{R}^{n_x} \quad (4.6.3)$$

Des contraintes sur les états sont parfois ajoutées pour empêcher le système de fonctionner à l'extérieur de ses limites de sécurité d'exploitation. Par exemple, sur les courants des convertisseurs, les contraintes supérieures sur la valeur absolue des courants peut être légèrement inférieure au niveau de déclenchement pour éviter les dommages dus aux surintensités.

Il est préférable d'imposer des contraintes douces plutôt que dures aux variables d'état pour éviter des problèmes numériques. Plutôt que de régler les variables contrôlées le long de leurs

## Chapitre IV. Commande prédictive

références. Les variables contrôlées peuvent être maintenues dans les limites supérieures et inférieures en leur imposant des contraintes souples.

### 4.2.2.3 Fonction coût

Les objectifs de contrôle sont traduits dans la fonction de coût, qui met en correspondants les séquences d'états futurs, les sorties et les variables manipulées en une valeur de coût scalaire. La fonction de coût facilite l'évaluation et la comparaison de l'impact prévu des différentes séquences de variables manipulées (ou de scénarios) dans le système ; cela permet à l'MPC de choisir le scénario le plus approprié qui est celui qui minimise la valeur de la fonction de coût.

Une définition générale de la fonction coût est donnée par :

$$J(x(k), U(k)) = \sum_{l=k}^{k+N_p-1} \Lambda(x(l), u(l)) \quad (4.7)$$

Sur la base de ses arguments, et en utilisant le modèle dynamique interne du système, les états futurs et les variables contrôlées peuvent être prédits sur l'horizon de prévision, et pénalisé en conséquence.

### 4.2.2.4 Phase d'optimisation

La minimisation de la fonction coût soumis à la fois à l'évolution de modèle du système interne en temps discret sur l'horizon de prévision et aux contraintes donne lieu à un problème de contrôle optimal en temps fini.

L'argument du résultat est la séquence optimale des variables manipulées,  $U_{opt}(k)$ .

$$U_{opt}(k) = \text{minimiser } J(x(k), u(k)) \quad (4.7.1)$$

$$\text{Soumis à } x(l+1) = A x(l) + B u(l) \quad (4.7.2)$$

$$y(l+1) = h(x(l+1)) \quad (4.7.3)$$

$$u(l) \in U \forall l = k, k+1, \dots, k+N_p-1 \quad (4.7.4)$$

### 4.2.2.5 Horizon de recul

La solution au problème d'optimisation donne à l'étape du temps  $k$  une séquence optimale en boucle ouverte de variables manipulées  $U_{opt}(k)$  de pas du temps  $k$  à  $k+N_p-1$ . Pour fournir

## Chapitre IV. Commande prédictive

un retour d'état, seul le premier élément de cette séquence, nommé  $U_{opt}(k)$ , est appliqué au système, à l'étape suivante  $k + 1$ , une nouvelle estimation d'état est obtenue et le problème d'optimisation est à nouveau résolu sur l'horizon décalé de  $k + 1$  à  $k + N_p$ . Cette politique s'appelle le contrôle de l'horizon de recul. Il est illustré sur la figure 4.2.

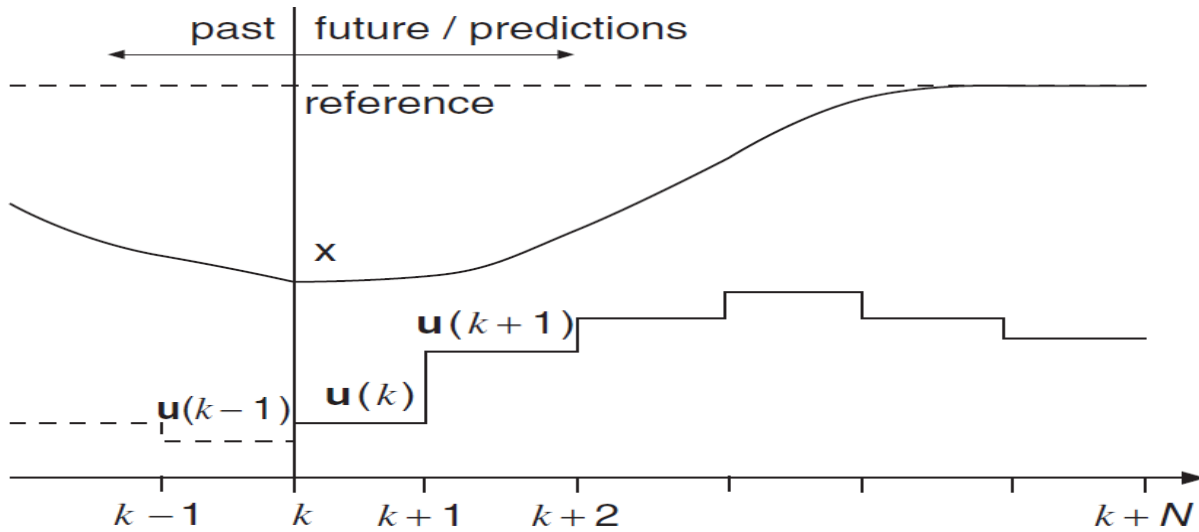


Figure 4.2 : Principe de la commande MPC [84].

### 4.2.2.6 Défis de la commande prédictive

A la lumière du principe de l'MPC décrit dans la section précédente, nous examinons dans ce qui suit les défis susmentionnés et la capacité de la commande.

Parmi les défis, les caractéristiques des systèmes électroniques de puissance qui sont des systèmes non-linéaire commutés, ainsi que les systèmes MIMO peuvent facilement être traités par l'MPC, tandis que le temps de calcul court disponible en électronique de puissance, demeure un défi majeur pour l'MPC.

Cependant, l'effort requis pour résoudre le problème d'optimisation sous-jacent à l'MPC est souvent considérable. Résoudre le problème d'optimisation dans le temps imparti (généralement dans une partie de l'intervalle d'échantillonnage) constitue un défi majeur. Etendre l'applicabilité de l'MPC de leur domaine d'application traditionnel des systèmes à long intervalles d'échantillonnage (ex: dans l'industrie) aux systèmes dont des courts intervalles d'échantillonnage (comme l'électronique de puissance) a donné lieu à des importants travaux de recherche dans trois directions cités ci après :

## Chapitre IV. Commande prédictive

- Le calcul de la loi de contrôle de retour d'état, la solution explicite pour tous les états, références et paramètres possibles. Dans de nombreux cas, cependant, l'espace de paramètres s'est avéré trop important, ce qui entraîné des problèmes insolubles sur le plan informatique [85].
- La mise en place des procédures d'optimisation et de solveurs avec des taux de convergence rapides et une faible charge de calcul.
- L'étude de nouvelles formulations de problème MPC et de méthodes de solution adoptées aux problèmes de contrôle spécifiques des systèmes d'électronique de puissance est l'orientation de la recherche qui est principalement poursuivi dans cette étude.

Ainsi, l'effort pour formuler les problèmes de contrôle de l'MPC est souvent assez faible, alors que l'effort pour résoudre le problème d'optimisation sous-jacent peut être décourageant. Malheureusement, la charge de calcul associée à la résolution de problème d'optimisation sous-jacent à l'MPC augmente exponentiellement avec la longueur de l'horizon de prévision. Les horizons de prévision à long terme donnent, en général, une meilleure performance en boucle fermée que les horizons courts. En particulier, le cas de l'horizon infini assure souvent une stabilité en boucle fermée, à condition qu'une solution à coût fini existe [86].

### **4.3 La commande prédictive pour les systèmes électroniques de puissance**

Dès les années 1980, la littérature a étudié les applications de la commande prédictive dans l'électronique de puissance pour les systèmes à haute puissance et à basse fréquence de commutation [82]. L'utilisation de fréquence de commutation plus élevée n'était pas possible à l'époque en raison du temps de calcul important requis pour l'algorithme de commande. Au cours des dernières décennies, grâce à l'amélioration des microprocesseurs puissants et à grande vitesse, l'intérêt pour le contrôle prédictif en électronique de puissance a considérablement augmenté [87].

Les constantes du temps pour l'électronique de puissance et les systèmes d'entraînement électrique sont de l'ordre de la milli-second et de la microseconde par rapport à la chimie et à la technique des procédés, pour cette raison, des taux d'échantillonnage beaucoup plus élevés sont nécessaires pour les contrôleurs dans ce domaine, ce qui entraîne également des exigences matricielles très élevées.

## Chapitre IV. Commande prédictive

Les convertisseurs électroniques de puissance sont des systèmes non linéaires avec un nombre fini d'appareils de commutation.

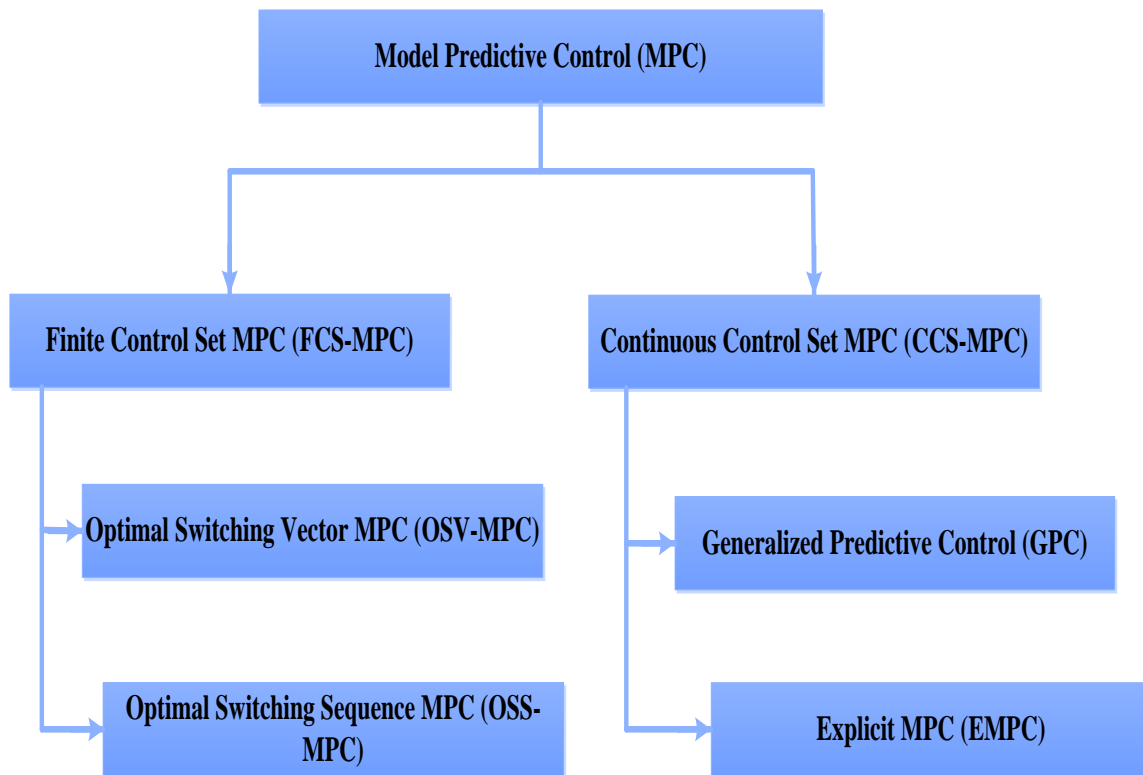
En outre, les techniques de contrôle prédictif coïncident avec les caractéristiques des plateformes de contrôle actuelles, telles que la mise en œuvre en temps discret et la modélisation basée sur les connaissances. Différents types de technique de contrôle prédictif appliqué dans les convertisseurs électroniques de puissance comprennent : le contrôle prédictif basé sur l'hystérésis, le contrôle du temps mort (dead-beat) et le contrôle prédictif de modèle [88,89]. Les différentes classes de la commande sont illustrées sur le schéma de la figure 4.3.

Dans les contrôles prédictifs basés sur l'hystérésis, les variables de contrôle sont limitées à l'intérieur d'une plage de tolérance pour générer les fonctions de commutation et permettent d'obtenir une fréquence de commutation variable. Tandis que dans le contrôle des temps morts, l'optimisation a lieu à l'instant d'échantillonnage suivant dans le but d'obtenir une erreur nulle entre la variable de contrôle et la valeur de référence [90] ; au contraire, une technique de contrôle prédictif (MPC) est divisée en deux autres types : le modèle prédictif continu (CCS-MPC) et le contrôle prédictif par modèle à ensemble fini (FCS-MPC) [91].

Le CCS-MPC utilise un modulateur pour générer les signaux de commutation respectifs des commutateurs de convertisseurs de puissance, tandis que FCS-MPC repose sur la minimisation d'une fonction d'optimisation pour générer les signaux de commutation requis. Comme le contrôle des temps-morts et le CCS-MPC utilisent tous les deux un modulateur, la fréquence de commutation est fixe. Pour FCS-MPC, la fréquence de commutation est variable. Différentes techniques de modèle prédictif sont couramment utilisées, en particulier le contrôle FCS-MPC qui sera abordé dans cette section. L'un des principaux avantages des contrôleurs prédictifs est que le concept est simple, direct à mettre en œuvre. Lorsqu'on considère le contrôle prédictif continu (CCS-MPC), l'implémentation de l'MPC pour certaines applications est plus complexe. Compte tenu de peu du temps disponible en raison de faible temps d'échantillonnage pour le calcul de l'algorithme MPC et l'optimisation de l'algorithme. Il est courant d'effectuer la plupart des calculs hors ligne en utilisant les paramètres du système et le modèle. Cette technique est connue sous le nom de l'MPC explicite où les actionneurs optimaux résultants sont sous la forme d'une table de consultation (look-up table). Cette table de consultation contient la solution

## Chapitre IV. Commande prédictive

optimale en fonction de l'état du système. MPC Explicite est utilisée dans la littérature pour une large gamme de convertisseurs électroniques de puissance [92].



**Figure 4.3 : Les différentes classes de la commande prédictive.**

Dans la méthode MPC explicite, le modèle de convertisseur électronique de puissance est approximé sous la forme d'un système linéaire par modulateur pour éliminer le besoin d'optimisation en ligne. Le principal inconvénient de cette technique est que les caractéristiques discrètes des convertisseurs électroniques de puissance ne sont pas prises en compte. Le problème d'implémentation et d'optimisation en ligne peut être pris en compte lorsque l'on inclut les caractéristiques discrètes des convertisseurs et le nombre fini d'états de commutation. Une plus grande flexibilité d'implémentation et des contraintes souhaitées pour le contrôleur peuvent être obtenues en considérant l'optimisation en ligne de la fonction de coût dans la méthode MPC. Dans la section suivante, nous abordons plus en détail cette technique, qui est au cœur de cette thèse.

### 4.3.1 Principe fondamental

## Chapitre IV. Commande prédictive

FCS-MPC pour les convertisseurs électroniques de puissance peut être conçu en suivant les étapes suivantes [90] :

- Modélisation du convertisseur de puissance identifiant tous les états de commutation possibles et sa relation avec les tensions où les courants d'entrées où de sortie.
- Définir une fonction de coût qui représente le comportement souhaité du système.
- Obtenir des modèles en temps discret qui permettent de prédire le comportement futur des variables.

Le contrôleur conçu doit tenir compte des tâches suivantes :

- Prévoir le comportement des grandeurs régulées pour tous les états de commutation possibles.
- Evaluer la fonction de coût pour chaque prévision.
- Sélectionner l'état de commande qui minimise la fonction coût.

### 4.3.2 Conception du contrôleur

Lors de la conception et la modélisation de l'MPC pour un convertisseur de puissance, l'élément de base est l'interrupteur de puissance. Considérons que le fonctionnement des interrupteurs tels que les IGBT est idéal, ils n'ont que deux états « ON » et « OFF ». Ainsi, le nombre de combinaisons des différents états de commutation moins les états impossibles est le nombre total d'états de commutation. Ces états de commutation impossibles sont ceux qui peuvent provoquer par exemple des courts-circuits.

En règle générale, le nombre d'état de commutation  $NEC(NSS)$  est déterminé comme suit :  
 $NEC = X^{N_p}$ .

$X$  est le nombre des états possible de chaque phase où branche de convertisseur de puissance et le nombre de phases où de branches est présenté par  $N_p$ . Par exemple, un convertisseur de trois phases à trois niveaux a  $3^3 = 27$  états de commutation.

## 4.4 Contrôle de convertisseur DC/AC interface le MR DC

Comme était présenté dans le chapitre précédent, les convertisseurs statiques jouent un rôle crucial dans l'interface des MRs ; pour les rendre plus efficaces un tel contrôle est nécessaire.

## Chapitre IV. Commande prédictive

Dans ce chapitre, la commande FCS-MPC est adoptée pour le contrôle de l'onduleur qui interface un DC MR en mode connecté au réseau principal et en mode d'îlotage. Dans cette technique, pour chaque période d'échantillonnage, les variables de contrôle seront évaluées par le modèle de prédiction établi, et la valeur minimale de la variable de contrôle dans la fonction sera choisie pour la période d'échantillonnage suivante.

Cette stratégie de contrôle élimine les techniques de contrôle linéaires qui sont à la base de la commande MLI (PWM). Ainsi, elle peut être rapidement réalisée par le processeur de signal numérique.

### 4.4.1 Principe de la commande FCS-MPC

Le principe du modèle prédire est illustré à la figure 4.4.  $S(t)$  est le signal de déclenchement pour commander l'onduleur électronique de puissance.  $T_s$  est la période d'échantillonnage.

Dans ce diagramme,  $x(t)$  est la variable d'état du système au moment  $t_k$ , l'état du système est  $x(t_k)$ .

On suppose qu'il existe  $n$  type de variables de contrôle, qui peuvent contrôler le système, et  $n$  est fini.

$S_i$  ( $i = 1 \dots \dots n$ ) est défini comme des contrôles du système selon la variable d'état  $x(t)$  et la fonction prédictive  $f$ , toutes les variables d'états  $x_i(t_k + 1) = f\{x(t_k), S_i\}$ ,  $i = 1, \dots \dots n$  peuvent être prédites au temps  $t_k$ . La fonction prédictive peut être de n'importe quelle forme ; tant qu'elle peut être appliquée à des stratégies de contrôle prédictif modélisées.

La fonction  $f$  peut être déduite par le modèle de discrétisation du système et ses paramètres. Une fonction  $f_g$  est définie pour déterminer le comportement de régulation optimale à un moment donné.

$f_g$  est constituée par une variable de référence,  $x^*(t)$  et la variable d'état prédite  $x_i(t_k + 1)$ , ce qui est :

$g_i = f_g\{x^*(t), x_i(t_{k+1})\}$ ,  $i = 1, \dots \dots n$ . La fonction commune est le carré de la différence entre la variable de référence et la variable d'état prédit ; ce qui est  $g_i = (x^*(t_k) - x_i(t_{k+1}))^2$ , à un



certain moment,  $n$  valeurs de la variable de contrôle dans le système amènera la fonction à obtenir  $n$  valeurs différentes  $g_i$ .

La figure 4.4 montre qu'à l'instant  $t = t_k$ , la variable de la commande  $S_3$  rend la fonction de valeur  $g_i$  au minimum. C'est pourquoi  $S_3$  est choisie au moment  $t = t_k$ , au moment  $t = t_{k+1}$ , la variable de commande  $S_2$  rend la fonction de valeur  $g_i$  au minimum.

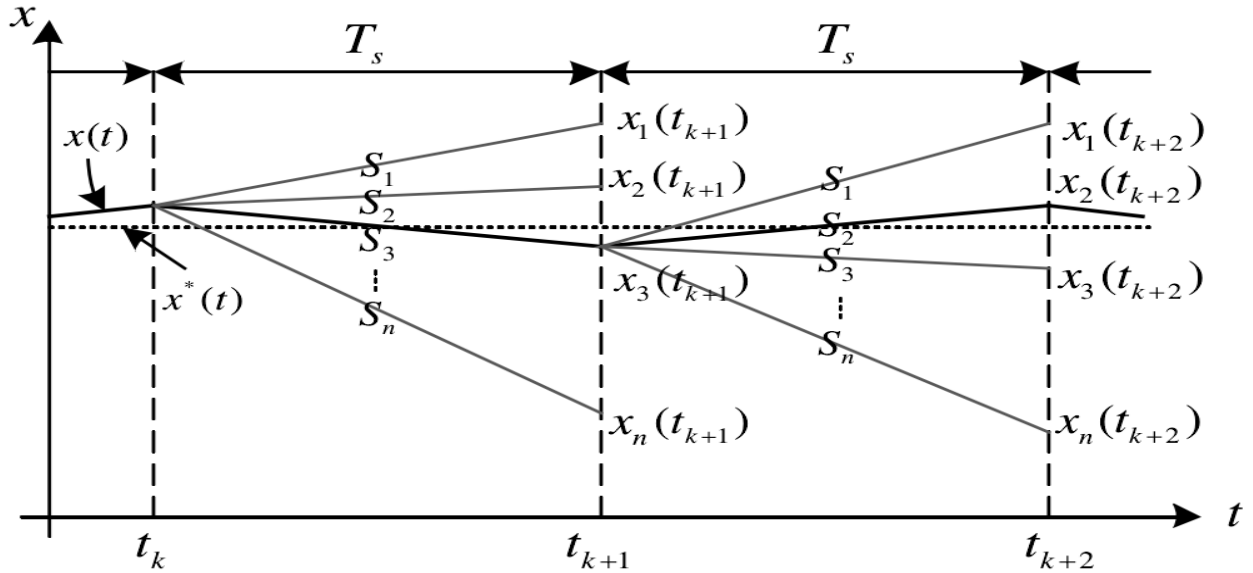


Figure 4.4 : Principe de la commande FCS-MPC [84].

#### 4.4.2 Contrôle prédictif de l'onduleur DC/AC en mode connecté au réseau

La présence croissante d'unités de production décentralisées à base de l'onduleur dans les réseaux de distribution (RD) exige des méthodes de contrôle qui atteignent des performances élevées non seulement dans des conditions normales d'exploitation, mais aussi dans des conditions déséquilibrées.

Traditionnellement, les onduleurs utilisés dans les MRs se comportent comme des sources de courant lorsqu'ils sont connectés au réseau et comme des sources de tension lorsqu'ils fonctionnent de manière autonome. Actuellement, la plupart des onduleurs des MRs adoptent la topologie des onduleurs de source de tension (VSI) avec un contrôleur de courant pour réguler le courant injecté dans le réseau.

## Chapitre IV. Commande prédictive

Les onduleurs à régulation de courant présentent les avantages d'une régulation de haute précision d'un courant instantané, d'une protection contre les pics de courant, d'une rejection des surcharges et d'une bonne dynamique. Les performances de VSI dépendent de la qualité de la stratégie de contrôle du courant appliquée, afin de répondre aux exigences de qualité de l'énergie, les onduleurs en MRs devraient avoir une très bonne capacité de rejet harmonique.

La configuration de l'onduleur raccordé au réseau utilisé à l'interface de DC MR étudié dans cette section est illustrée à la figure 4.5 le système de configuration contiens des sources des énergies renouvelables qui délivrent une tension continu au bus commun ; puis connecté avec un onduleur triphasé à deux niveaux.

La commande FCS-MPC est appliquée dans cette partie pour la régulation du courant de l'onduleur proposé dans la référence [93]. La stratégie de commande prédictive proposée repose sur le fait que seul un nombre fini d'états de commutation possibles peut être généré par l'onduleur et que le modèle du système peut être utilisé pour prévoir le comportement des variables pour chaque état de commutation.

Pour la sélection de l'état de commutation approprié à appliquer, un critère de sélection doit être défini. Ce critère consiste en une fonction de coût qui sera évaluée pour les valeurs prévues des variables à contrôler. La prédiction de la valeur future de ces variables est calculée pour chaque état de commutation possible, puis l'état qui minimise la fonction de coût est sélectionné.

Cette stratégie de contrôle peut être résumée dans les étapes suivantes :

- définir une fonction de coût.
- construire un modèle du convertisseur et de ses états possibles.
- construire un modèle de la charge pour la prédiction.

Un temps discret de la charge est nécessaire pour prédire le comportement de la variable évaluée par la fonction de coût, c'est-à-dire les courants de charge.

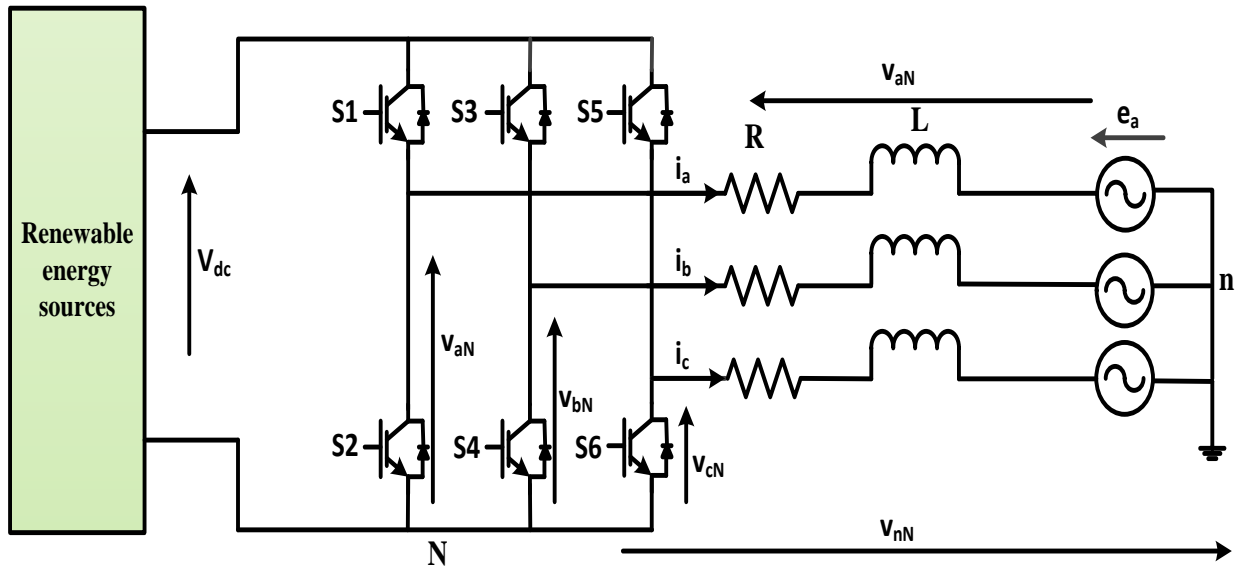


Figure 4.5 : Schéma de configuration de système étudié.

#### 4.4.3 Modèle de convertisseur

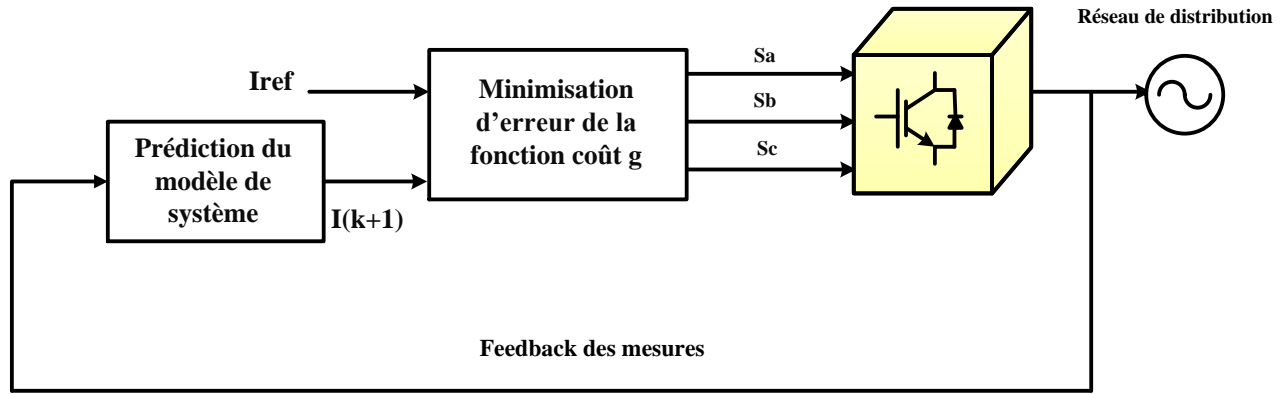
Le circuit de puissance de l'onduleur triphasé convertit l'alimentation électrique en courant continu en courant alternatif selon le schéma électrique illustré à la figure 4.6. Considérant que les deux interrupteurs de chaque phase de l'onduleur fonctionnent en mode complémentaire afin d'éviter les courts-circuits.

l'état de commutation des interrupteurs de puissance  $S_x$ , avec  $x = 1, \dots, 6$ , peut être représenté par les signaux de commutation  $S_a, S_b$  et  $S_c$  défini comme suit :

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{Si } S_1 \text{ on et } S_2 \text{ off} \\ 0 & \text{Si } S_1 \text{ off et } S_2 \text{ on} \end{cases} \quad (4.8.1)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{Si } S_3 \text{ on et } S_4 \text{ off} \\ 0 & \text{Si } S_3 \text{ off et } S_4 \text{ on} \end{cases} \quad (4.8.2)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{Si } S_5 \text{ on et } S_6 \text{ off} \\ 0 & \text{Si } S_5 \text{ off et } S_6 \text{ on} \end{cases} \quad (4.8.3)$$



**Figure 4.6 : Schéma de commande de la commande prédictive.**

Les signaux de commutation définissent la valeur de la tension de sortie :

$$v_{aN} = S_a V_{dc} \quad (4.9.1)$$

$$v_{bN} = S_b V_{dc} \quad (4.9.2)$$

$$v_{cN} = S_c V_{dc} \quad (4.9.3)$$

Où  $V_{dc}$  est la tension d'alimentation.

Afin d'obtenir les tensions effectives appliquées à travers chaque phase (c'est-à-dire de a, b et c au point n), la tension de mode commun  $v_{nN}$  doit être soustraite de la valeur de (4.9).

La tension en mode commun peut simplement être calculée en tenant compte de la loi de tension de Kirchhoff :

$$v_{nN} = \frac{v_{aN} + v_{bN} + v_{cN}}{3} \quad (4.10)$$

En conséquence, la tension de phase effective est donnée par :

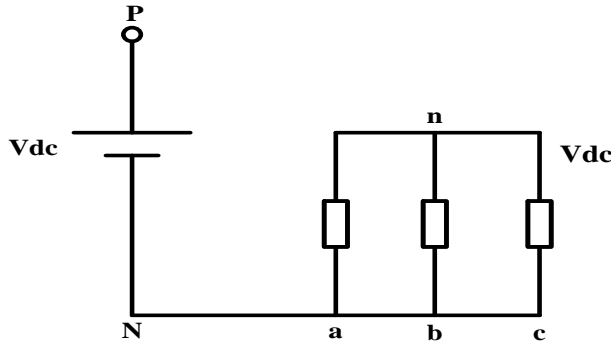
$$\begin{cases} v_{an} = v_{aN} - v_{nN} \\ v_{bn} = v_{bN} - v_{nN} \\ v_{cn} = v_{cN} - v_{nN} \end{cases} \quad (4.11)$$

En considérant le vecteur unitaire  $a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ , ce qui représente le déphasage de  $120^\circ$  entre les phases, le vecteur de tension de sortie peut être défini comme suit :

$$v = \frac{2}{3}(v_{aN} + av_{bN} + a^2v_{cN}) \quad (4.12)$$

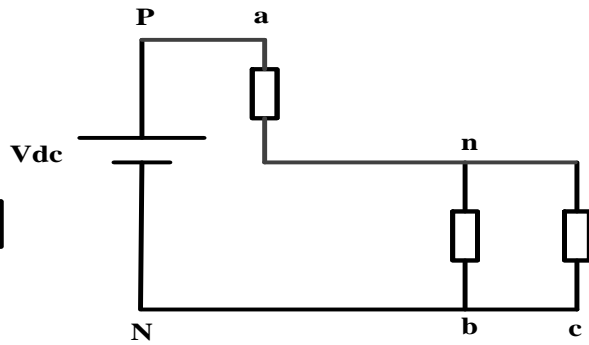
## Chapitre IV. Commande prédictive

Où  $v_{aN}$ ,  $v_{bN}$  et  $v_{cN}$  sont les tensions phase-neutre de l'onduleur.



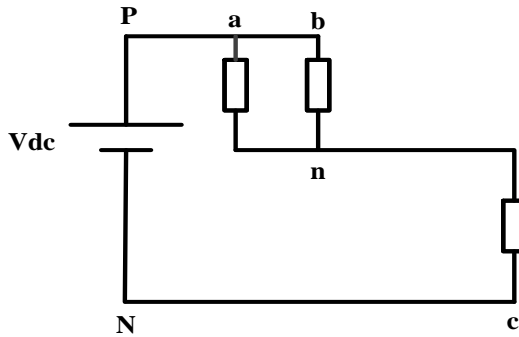
$$\begin{cases} v_{an} = 0 \\ v_{bn} = 0 \\ v_{cn} = 0 \end{cases} \quad (4.12.1)$$

(a)



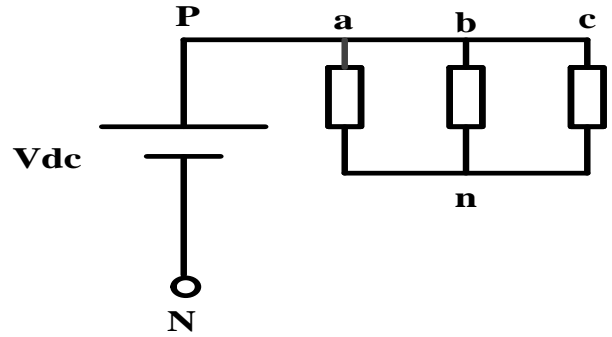
$$\begin{cases} v_{an} = \frac{2}{3}V_{dc} \\ v_{bn} = -\frac{1}{3}V_{dc} \\ v_{cn} = -\frac{1}{3}V_{dc} \end{cases} \quad (4.12.2)$$

(b)



$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}V_{dc} \\ v_{bn} = \frac{1}{3}V_{dc} \\ v_{cn} = \frac{1}{3}V_{dc} \end{cases} \quad (4.12.3)$$

(c)



$$\begin{cases} v_{an} = 0 \\ v_{bn} = 0 \\ v_{cn} = 0 \end{cases} \quad (4.12.4)$$

(d)

**Figure 4.7 : Configurations de charge équivalentes pour différents états de commutation.**

De cette façon, l'état de commutation  $(S_a, S_b, S_c) = (0, 0, 0)$  génère un vecteur de tension  $v_0$

$$\text{défini comme } v_0 = \frac{2}{3}(0 + a * 0 + a^2 * 0) = 0 \quad (4.13.a)$$

## Chapitre IV. Commande prédictive

Et correspond au circuit illustré à la figure 4.7.a.

L'état de commutation  $(S_a, S_b, S_c) = (1, 0, 0)$  génère un vecteur de tension défini  $v_1$  comme suit :

$$v_1 = \frac{2}{3}(V_{dc} + a * 0 + a^2 * 0) = \frac{2}{3}V_{dc} \quad (4.13.b)$$

Vecteur de tension  $v_2$  généré par l'état de commutation  $(S_a, S_b, S_c) = (1, 1, 0)$  et défini comme suit :

$$v_2 = \frac{2}{3}(V_{dc} + a * V_{dc} + a^2 * 0) = \frac{2}{3}\left(V_{dc} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)V_{dc}\right) = \frac{V_{dc}}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc} \quad (4.13.c)$$

Et correspond au circuit illustré à la figure 4.7.b.

L'état de commutation  $(S_a, S_b, S_c) = (1, 1, 1)$  génère un vecteur de tension défini  $v_7$  qui est calculé comme :

$$v_7 = \frac{2}{3}(V_{dc} + aV_{dc} + a^2V_{dc}) = \frac{2}{3}V_{dc}(1 + a + a^2) = 0 \quad (4.13.d)$$

De différents états de commutation génèrent des configurations différentes de la charge triphasée connectée à la charge de source du courant continu, comme illustré sur la figure 4.5.

Prendre en compte toutes les combinaisons possibles des signaux de déclenchement  $S_a, S_b$  et  $S_c$ , huit états de commutation et par conséquent huit vecteurs de tension sont obtenus comme indiqué dans le tableau 4.1.

Notons que  $v_0 = v_7$ , ce qui donne un ensemble fini de seulement sept vecteurs de tension différents dans le plan complexe comme montre la figure 4.8.

L'onduleur est considéré comme un système non-linéaire discret avec seulement sept états différents comme sortie possible.

Il convient de noter qu'un modèle plus complexe du modèle de convertisseur pourrait être utilisé pour des fréquences de commutation plus élevées. Il peut inclure la modélisation du temps mort, de la tension de saturation IGBT et de la chute vers l'avant des diodes. Dans cette section un modèle simple de l'onduleur est utilisé.

## Chapitre IV. Commande prédictive

Basons sur le niveau de tension de sortie correspondant, les vecteurs spatiaux présentés sont séparés en états actifs et en états zéros.

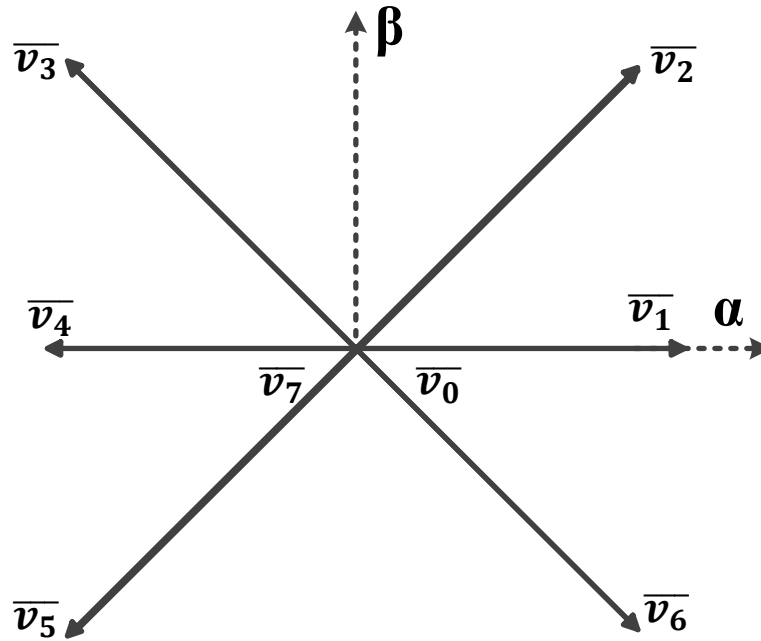


Figure 4.8 : Vecteurs de tension dans le plan complexe.

### 4.4.4 Equations de VSI

Un onduleur triphasé raccordé au réseau avec un filtre L, tel qu'il est déjà illustré sur la figure 3.5, est considéré pour cette étude. La transformation de Clarke est utilisée pour transformer le système de trois phases abc à deux phases  $\alpha\beta$  avec amplitude invariante ; qui est représenté par la matrice T.

$$\bar{v} = v_{\alpha} + jv_{\beta} = T [v_a \ v_b \ v_c]' \quad (4.14)$$

$$\bar{i} = i_{\alpha} + ji_{\beta} = T [i_a \ i_b \ i_c]' \quad (4.15)$$

Où

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

## Chapitre IV. Commande prédictive

$S_a$	$S_b$	$S_c$	Vecteurs de tension
0	0	0	$\bar{v}_0 = 0$
1	0	0	$\bar{v}_1 = \frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	0	$\bar{v}_2 = \frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	0	$\bar{v}_3 = -\frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	1	$\bar{v}_4 = -\frac{2}{3}V_{dc}$
0	0	1	$\bar{v}_5 = -\frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	0	1	$\bar{v}_6 = \frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	1	1	$\bar{v}_7 = 0$

**Tableau 4.1 : Configuration de commutateurs et vecteurs de tension complexes pour VSI.**

En tenant compte des définitions des variables du circuit représenté sur la figure 4.7 Les équations de la dynamique du courant de charge pour chaque phase peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = v_{aN} - e_a \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = v_{bN} - e_b \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = v_{cN} - e_c \end{cases} \quad (4.17)$$

Où R est la résistance de charge et L l'inductance de charge.

Le vecteur courant de charge peut être exprimé en  $\alpha\beta$  comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

En remplaçant (4.18) et (4.19) dans (4.17) on obtient :



$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = V_\alpha - Ri_\alpha - e_\alpha \\ L \frac{di_\beta}{dt} = V_\beta - Ri_\beta - e_\beta \end{cases} \quad (4.20)$$

#### 4.4.5 Discrétisation de modèle de prédiction

Cette section décrit le processus de discrétisation de l'équation du courant de charge (4.20) pour un temps d'échantillonnage  $T_s$ . Le modèle en temps discret sera utilisé pour prédire la valeur future du courant de charge à partir des tensions et des courants mesurés au  $k$ ème instant d'échantillonnage. Plusieurs méthodes de discrétisation peuvent être utilisées afin d'obtenir un modèle en temps discret adapté au calcul des prédictions.

Étant donné que la charge peut être modélisée comme un système de premier ordre, le modèle en temps discret peut être obtenu par une simple approximation de la dérivée. Cependant, pour les systèmes plus complexes, cette approximation peut introduire des erreurs dans le modèle et une méthode de discrétisation plus précise est nécessaire.

Dans notre travail l'approximation d'Euler est utilisée pour la discrétisation du courant ; la dérivée est approximée comme :

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (4.21)$$

Qui est substitué en (4.20) pour obtenir une expression qui permet de prédire le courant de charge futur au temps  $k + 1$ , pour chacune des sept valeurs du vecteur de tension  $v(k)$  généré par l'onduleur. Cette expression sera donc écrire :

$$\begin{cases} i_\alpha(k) = \frac{1}{RT_s+L} [Li_\alpha(k-1) - T_s e_\alpha(k) + T_s V_\alpha(k)] \\ i_\beta(k) = \frac{1}{RT_s+L} [Li_\beta(k-1) - T_s e_\beta(k) + T_s V_\beta(k)] \end{cases} \quad (4.22)$$

En décalant le temps discret d'un pas vers l'avant dans (4.22), le courant de charge futur peut être déterminé par :

$$\begin{cases} i_\alpha(k+1) = \frac{1}{RT_s+L} [Li_\alpha(k) - T_s e_\alpha(k+1) + T_s V_\alpha(k+1)] \\ i_\beta(k+1) = \frac{1}{RT_s+L} [Li_\beta(k) - T_s e_\beta(k+1) + T_s V_\beta(k+1)] \end{cases} \quad (4.23)$$

## Chapitre IV. Commande prédictive

Où,  $\{i_\alpha(k+1), i_\beta(k+1)\}$  sont les valeurs prédites du courant à l'instant  $(k+1)$ ; et  $\{i_\alpha(k), i_\beta(k)\}$  sont les valeurs mesurées à l'instant  $(k)$ . Il y a sept vecteurs de tension de sortie possibles, ce qui signifie qu'il y a sept vecteurs de courant de charge différents comme courant futur mesuré. Alors nous pouvons sélectionner le vecteur de tension pour estimer le comportement futur du système.

### 4.4.6 Conception de la commande FCS-MPC

La commande FCS-MPC est une approche de contrôle qui fournit des valeurs de sortie optimales en minimisant une fonction de coût. La procédure suivante devrait être suivie afin de concevoir la commande FCS-MPC pour l'onduleur :

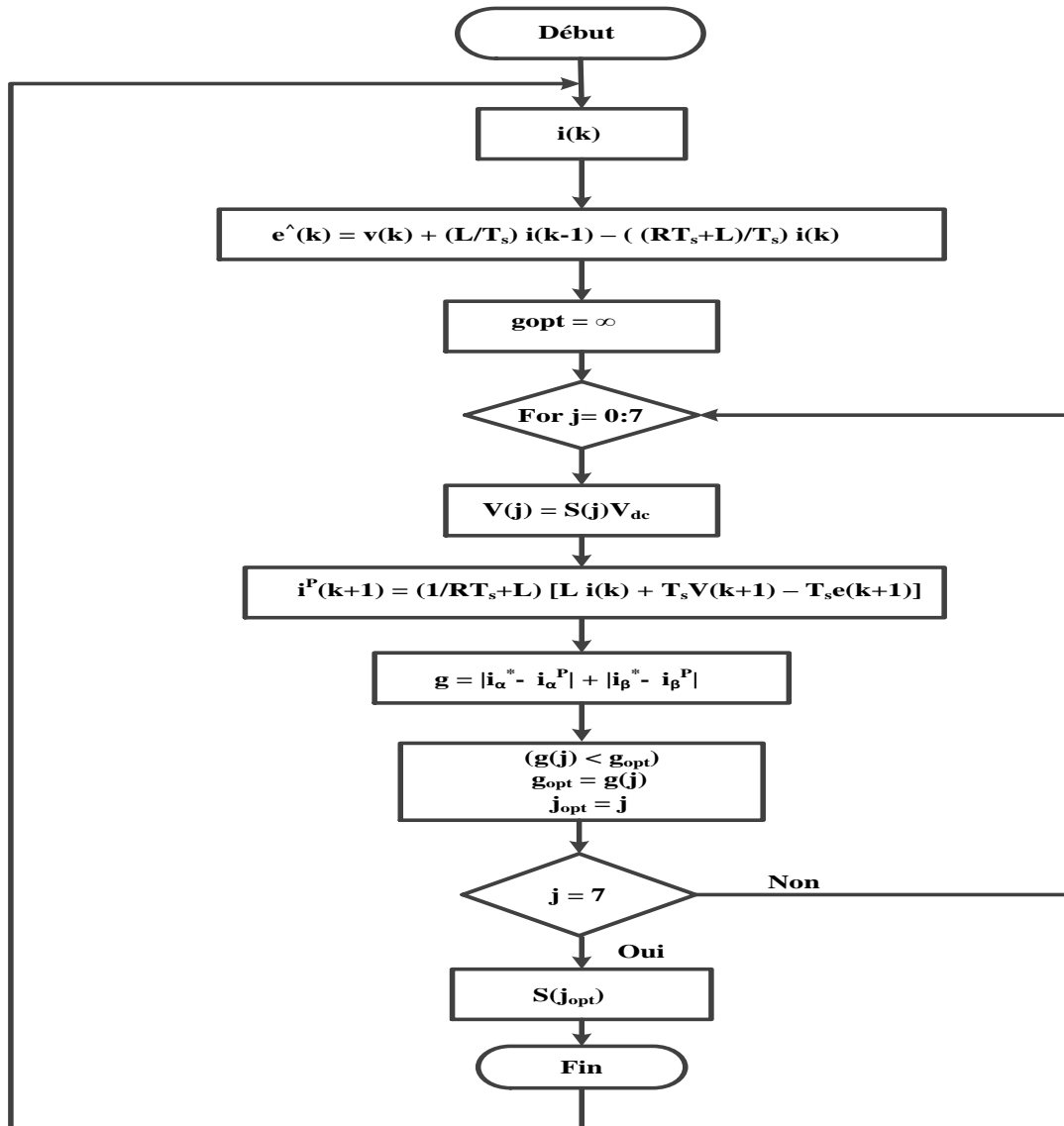
- Développer le modèle du système en temps continu.
- Développer le modèle discret du système.
- Définir une fonction de coût pour évaluer chaque sortie de courant possible du VSI afin d'obtenir la solution optimale.
- Générer des signaux de commutation appropriés pour le VSI.

L'organigramme de la figure 4.9 illustre l'algorithme utilisé pour le contrôle du courant de l'onduleur par la commande FCS-MPC.

### 4.4.7 Résultats de simulation

Dans ce chapitre la commande FCS-MPC était appliquée sur le convertisseur DC/AC connecté au DC MR pour la régulation du courant de charge de l'onduleur, les résultats de simulation sont présentés sur les figures ci-après avec des paramètres donnés sur le tableau 4.2.

## Chapitre IV. Commande prédictive



**Figure 4.9 : Organigramme de la commande FCS-MPC.**

Paramètres	Valeurs
$V_{dc}$	380 V
R	10 $\Omega$
L	15mH
$T_s$	25 $\mu$ s
Back-EMF amplitude (e)	100 V

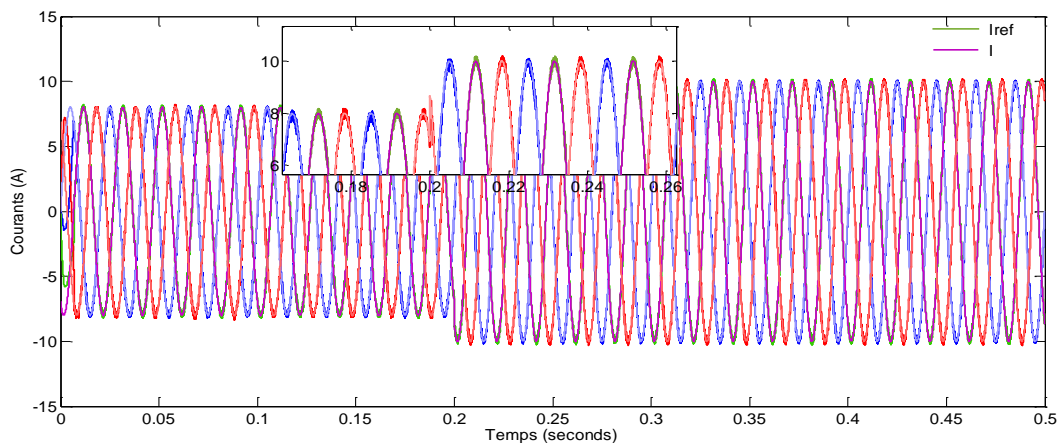
**Tableau 4.2 : Paramètres de simulations**

## Chapitre IV. Commande prédictive

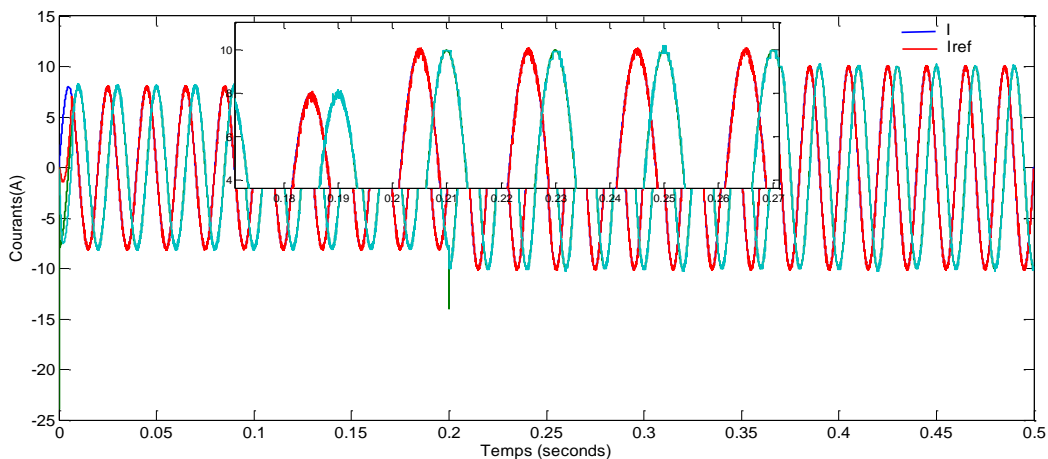
La réponse du système est montrée sur la figure 4.10 ; on peut observer sur la figure que le courant de charge a suivi sa référence malgré qu'elle change entre 10A et 12A. Comme on peut aussi voir sur la figure 4.10.a. que les courants de charge  $i_\alpha$  et  $i_\beta$  atteignent leurs références avec une dynamique très rapide.

Les comportements des courants de charge et de la tension dans une phase en régime permanent sont présentés sur la figure 4.10.b ; on peut voir que le courant et la tension sont en phase.

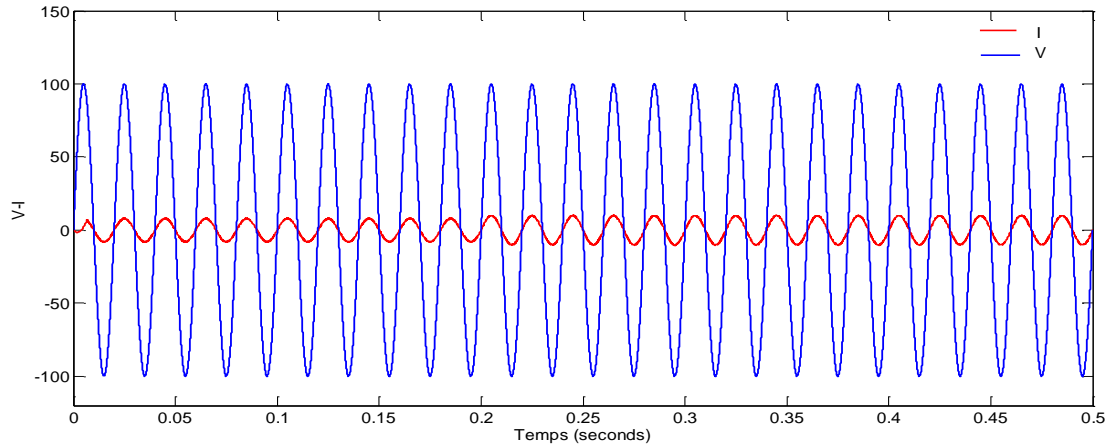
Les courants de références  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  et  $i_c$  sont également présentés sur la figure 4.10.b ; on peut voir très claire que l'amplitude des courants de charge change très rapidement après le changement de la référence. Les courants sont sinusoïdaux avec une faible distorsion harmonique comme montre la figure 4.11.



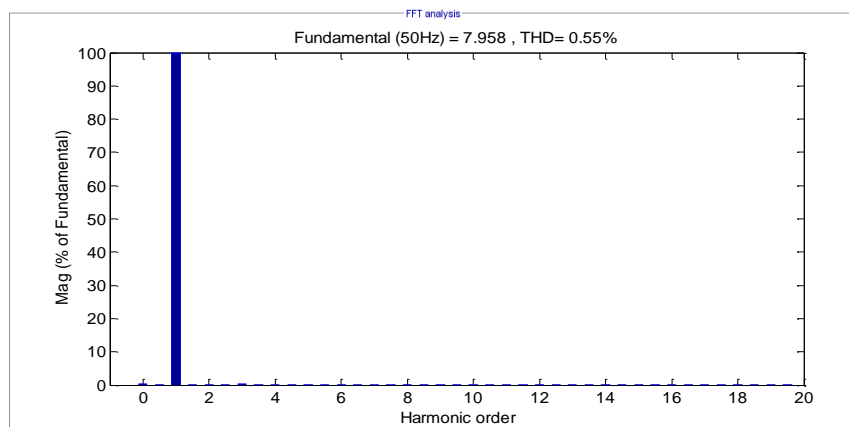
**Figure 4.10.a : Courant de charge et sa référence.**



**Figure 4.10.b : Courant de charge et sa référence en  $\alpha\beta$ .**



**Figure 4.10.c : Courant de charge et la tension de sortie.**



**Figure 4.11 : Distorsion harmonique totale du courant.**

### 4.5 Contrôle de la tension en mode d'îlotage

L'îlotage est le processus qui consiste à déconnecter le MR du réseau électrique principal ; la déconnexion peut être planifiée ou non planifiée. L'îlotage planifié a lieu à des fins d'entretien ou si l'on s'attend à ce que l'électricité reçue du réseau électrique alimente le MR. En revanche, l'îlotage non planifié se produit en raison de défaillances ou de conditions anormales.

Le contrôle primaire des MRs est appliqué pour la régulation de la puissance active et réactive de sortie des générateurs distribués (GDs) connectés au réseau, ainsi que le contrôle de la tension et

## Chapitre IV. Commande prédictive

de la fréquence des GDs en mode îlot. L'interrupteur d'interconnexion déconnecte le MR du réseau principal en cas de panne ou de perturbations; dans cette situation, le MR fonctionnera de manière autonome et prendra la responsabilité d'alimenter les charges. En outre, le MR doit assurer que la tension et la fréquence sont dans les limites acceptables.

L'événement où il y'a une panne du courant due à une déconnexion du réseau principal que le MR peut déconnecter en utilisant les algorithmes appropriés.

Les GDs sont responsables de la régulation de la tension et de la fréquence dans les MRs. Lorsqu'un MR fonctionne en mode d'îlotage, un léger écart par rapport à la tension et à la fréquence nominales peut se produire. Par conséquent, les GDs doivent maintenir la stabilité du système en réduisant cette variation. Cela peut se faire en mettant en œuvre la technique de contrôle appropriée sur les unités des GDs, ce qui permet d'équilibrer le système [94].

Les systèmes de production décentralisés avec les convertisseurs de puissance comme VSI sont encourageants grâce à leur fiabilité de service élevée, de la qualité d'énergie et de flexibilité, de moindres pertes dans le transport de distribution et d'une dépendance moins vis-à-vis des coûts de combustible lors de l'utilisation de sources d'énergie renouvelables en mode d'îlotage.

Dans ce chapitre le contrôle de la tension était effectué basant sur la commande FCS-MPC pour un système MR en mode îloté.

### **4.5.1 Problèmes existants en mode d'îlotage**

De nombreux problèmes doivent être pris en compte lorsqu'un MR est exploité en mode déconnecté. Les points suivants sont tirés d'un article publié par l'institut des ingénieurs électriciens et électroniciens ( Institute of Electrical and Engineers (IEEE)) ; qui résumait les principaux enjeux du fonctionnement en mode îlot [95].

### **4.5.2 Contrôle de la fréquence et de la tension**

Contrairement à l'exploitation raccordée au réseau où la tension et la fréquence du MR sont déterminées à partir du réseau électrique. En mode îlot, la tension et la fréquence du MR sont contrôlées en ajustant ceux d'une ou plusieurs MRs. Il est très important de maintenir la fréquence dans les limites acceptables ; Dans le cas contraire, s'il tombe en dehors des limites, la charge risque de se détacher temporairement.

## Chapitre IV. Commande prédictive

### 4.5.3 Equilibre entre l'offre et la demande

Il existe trois conditions de fonctionnement possible de l'équilibre de l'offre et de la demande en mode de fonctionnement îlot : surplus d'offre, pénurie d'offre et l'équilibre entre l'offre et la demande.

En cas de surplus d'approvisionnement, la diminution de la production d'électricité dans les MRs peut être utilisée pour équilibrer le système. Toutefois, en cas de pénurie d'approvisionnement, la technique de délestage sur les charges non critiques peut être utilisée pour maintenir l'équilibre du système. De plus, si le MR échange de l'électricité avec le réseau principal avant de passer en mode d'îlotage, les actions de contrôle secondaire doivent être appliquées pour assurer que la puissance initiale est équilibrée dans le MR après une fluctuation soudaine de l'offre ou de la demande.

### 4.5.4 Qualité de l'énergie

La qualité de l'alimentation du MR doit toujours être en bon état :

- le MR devrait prendre la responsabilité de préserver une qualité de puissance adéquate avec une alimentation suffisante en puissance réactive afin de minimiser les affaissements de tension.

### 4.5.5 Enjeux des GDs

Il y'a de nombreux problèmes liés aux GDs en mode déconnecté. Par exemple, certains générateurs ont une réponse tardive ; lors de la mise en œuvre d'un contrôle secondaire de tension et de fréquence. De plus, le MR n'a pas de réserve de filature comme le réseau électrique, mais il possède des batteries intégrées pour la production d'électricité et la distribution qui peuvent être considérées comme des réserves de filature de MR.

L'onduleur réagit rapidement à un signal de demande rapide et ajuste les niveaux de flux en puissance.

### 4.5.6 Communication entre les composants du MR

## Chapitre IV. Commande prédictive

La mise en œuvre d'une infrastructure de communication appropriée entre les composants d'un MR est une question très importante lors du choix de l'approche de contrôle pour un MR insulaires.

### **4.5.7 Îlotage en MR**

En plus des facteurs susmentionnés, le MR doit être préparé à un îlotage planifié. Il est responsable de maintenir la continuité de l'alimentation électrique pendant les arrêts planifiés.

### **4.5.8 Transition entre le mode connecté au réseau et le mode îlot**

Le temps de transition est le temps pendant lequel le MR commute son mode de fonctionnement. Afin d'assurer un niveau de fiabilité élevé, le temps de restauration doit être réduit autant que possible. Lorsque le MR est déconnecté du réseau électrique principal, l'interrupteur d'interconnexion doit ajuster et modifier la référence de puissance pour correspondre à la valeur nominale. De plus, l'écart maximal autorisé pour la tension et la fréquence est respectivement de 5% et 2%. Si le commutateur d'interconnexion reconnaît que le défaut où la perturbation dans le réseau électrique n'existe plus, il reconnecte le MR. Toutefois, certaines questions doivent être prises en compte au cours du processus de restauration, telles que l'équilibrage de la puissance réactive, la séquence de démarrage et la coordination des GDs [96].

### **4.5.9 Fonctionnement de MR en mode d'îlotage**

Parfois, le MR doit isoler les GDs pour éviter un îlotage involontaire. L'objectif n'est pas seulement de protéger le réseau ou les GDs, mais plutôt la sécurité et la protection de toute personne qui pourrait être assise à proximité ou en contact avec ces GDs à ce moment, le fonctionnement de MR en mode déconnecté devrait être considéré comme opération alternative, même si l'utilisation de mode îlot augmentera la fiabilité des MR [97].

### **4.5.10 Contrôle de MR en mode d'îlotage**

L'îlotage de MR peut se produire par des événements imprévus tels que les défaillances du réseau ou par des actions planifiées telles que les besoins de maintenance. Dans ce cas, le profil de production locale de MR peut être modifié afin de réduire le déséquilibre entre la production et la charge locale et de réduire le transitoire de déconnexion.

### **4.5.11 Contrôle d'onduleur de source de tension**



## Chapitre IV. Commande prédictive

Le contrôle de l'onduleur de source de tension (VSI) a un comportement similaire à celui d'une machine asynchrone, il peut contrôler la tension et la fréquence du système AC. Le contrôle de VSI est utilisé pour contrôler le MR en mode îlot.

Fondamentalement, le but de VSI est d'alimenter la charge avec une valeur prédéfinie de tension et de fréquence où sa puissance de sortie active et réactive est contrôlée dépendamment de la charge.

La manière conventionnelle de réaliser une structure de contrôle global de VSI dans les MRs est par des boucles linéaires organisées hiérarchiquement et un modulateur de largeur d'impulsion (MLI) [98]; cependant, bien qu'elle soit largement acceptée dans la pratique, cette méthode souffre de plusieurs limitations pratiques.

Enfin, la grande majorité des publications supposent un temps d'échantillonnage commun à tous les convertisseurs par défaut. Afin d'atteindre cette condition dans la pratique, de multiples convertisseurs doivent être synchronisés et réglementés essentiellement comme un seul et même système qui est en contradiction évident avec le désir d'avoir un système de contrôle décentralisé.

Contrairement à la commande linéaire, le modèle de commande à base de FCS-MPC s'appuie sur un système de contrôle prédictif qui repose fondamentalement sur des principes différents. Au lieu de concevoir une boucle indépendante pour chaque variable contrôlée et de les mettre en cascade, il utilise un modèle discret de VSI avec filtre associé pour prédire son comportement futur pour toutes les entrées de commande possibles, et appliquer par conséquent celle qui devrait minimiser une fonction coût préprogrammée à l'étape d'échantillonnage suivant [99]. Une tel FC est plus souvent basée sur un carré de distance euclidienne entre la variable contrôlée et le signal de référence. En raison de sa robustesse, de ses excellentes caractéristiques transitoires et de sa facilité à inclure des non-linéarités, des contraintes et des objectifs de contrôle supplémentaires, le principe de la commande FCS-MPC s'est imposé comme une alternative intéressante pour le contrôle des convertisseurs connectés au réseau et des filtres actifs, ainsi que le contrôle du couple des commandes électriques [100]. Cependant, la plupart des systèmes électriques de puissance auxquels la commande FCS-MPC a été appliquée jusqu'à présent comprenaient une forte force électromotrice (EMF) située derrière le filtre inductif du premier ordre. Contrairement, il n'y a pas de champ électromagnétique fort dans le cas des MRs autonome, alors que les filtres sont généralement de type LC de second ordre. Dans ce cas, il existe un couplage dynamique

## Chapitre IV. Commande prédictive

entre les variables d'état du filtre et une FC basée sur la distance euclidienne fournit une performance relativement faible en régime permanent car il ne prend pas en compte ces dynamiques couplées [101]. Une approche possible pour contourner ce problème est le déploiement d'horizon de prédiction plus long. Cependant, cela entraîne non seulement une augmentation significative de dépenses de calcul, mais exige également un modèle très précis du système pour son bon fonctionnement. Bien qu'il soit noté que l'atténuation des coûts de calcul élevés a récemment été proposée à l'aide des algorithmes de décodages de sphère, cette approche est limitée aux systèmes linéaires [102]. De plus, de tels algorithmes sont assez compliqués à mettre en œuvre dans la pratique et n'apportent que des améliorations marginales pour les VSI à deux niveaux si l'on utilise une FC appropriée. Dans ce qui suit on va expliquer la commande FCS-MPC pour le contrôle de la tension à la sortie de VSI raccordé à un MR en mode d'îlotage.

### 4.6 Description du système

Le système étudié dans ce chapitre est montré sur la figure 4.12; Il comprend plusieurs générateurs distribués, qui sont connectés au bus DC commun par l'intermédiaire d'un onduleur DC/AC à deux niveaux.

En général, un tel MR peut également être raccordé au réseau principal et peut transférer de manière transparente entre le mode connecté au réseau et le mode autonome. Le système illustré à la figure.4.12. Peut fonctionner en mode îlot par l'ouverture de l'interrupteur (circuit breaker).

En ce qui concerne les fonctionnalités des VSI en tant qu'élément constitutif principal de MR, on peut les diviser en trois grandes catégories, à savoir les VSI formant un réseau, alimentant un réseau et supportant un réseau. Cette dernière catégorie joue un rôle important lorsque deux VSI ou plusieurs sont connectés en parallèle ; dans ce cas leurs amplitudes de tension et leurs fréquences doivent être adaptées en ligne en fonction des conditions de charge afin d'assurer le bon partage de la puissance entre les différents modules. La commande droop fonctionne au plus haut niveau de commande primaire, elle repose donc sur la capacité de régulation de tension des couches de commande en-dessous. Toute cette structure est mise en œuvre de manière conventionnelle en utilisant des boucles linéaires en cascade, ces boucles sont conçues indépendamment l'une de l'autre, ce qui signifie que chaque boucle extérieure doit avoir un ordre de grandeur inférieur à celui en-dessous. Par conséquent, le contrôle hiérarchique traditionnel de MR souffre d'une réponse transitoire très lente [103]. Motivés par cette limitation, nous

proposons dans [104] une nouvelle structure de contrôle pour un MR en mode d'îlotage qui représente les capacités transitoires attrayantes de la commande FCS-MPC pour le convertisseur VSI.

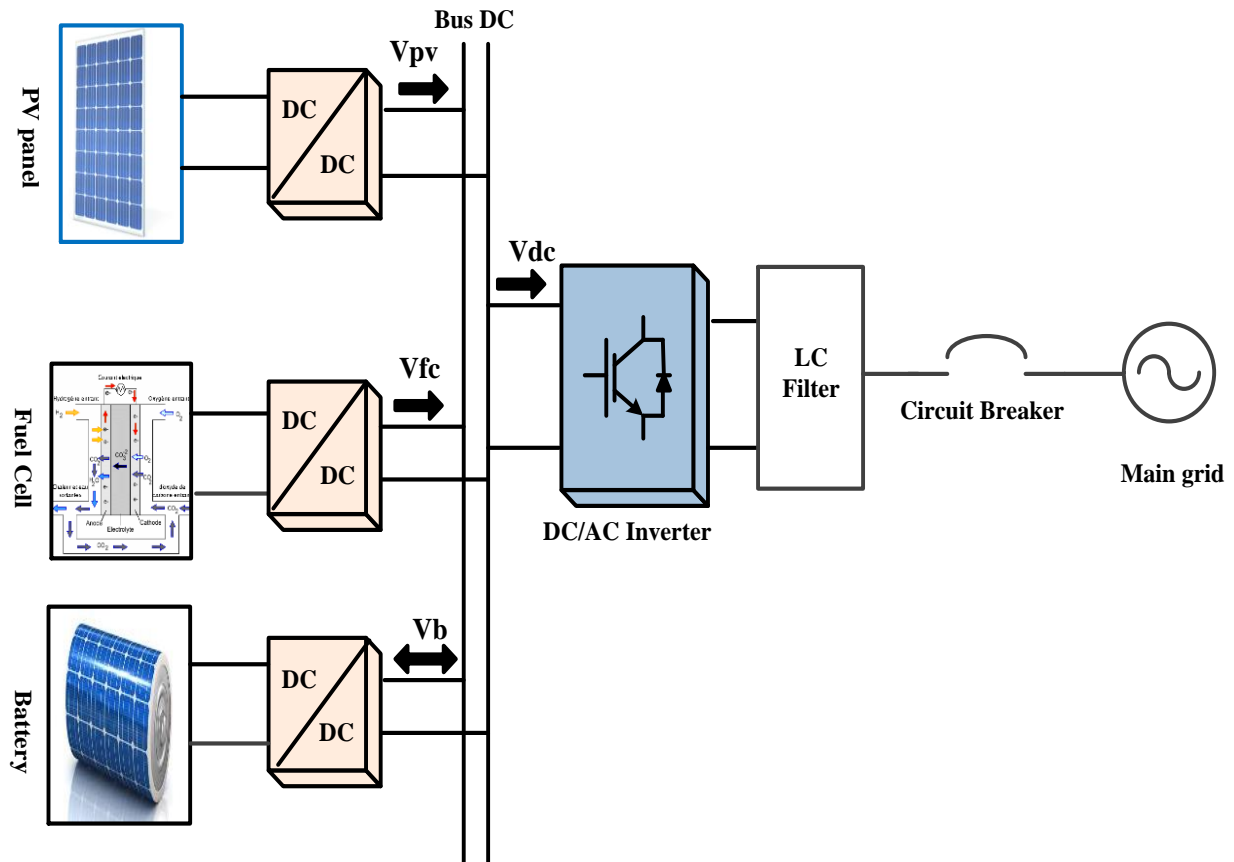


Figure 4.12 : Schéma de système en mode d'îlotage.

#### 4.7 Modélisation et discrétisation de VSI

Comme son nom indique, une stratégie de contrôle MPC s'appuie sur le modèle du système pour prédire comment les actions de contrôle possibles auraient une incidence sur sa réponse. Par conséquent, la mesure qui devrait réduire au minimum une certaine FC est appliquée et le processus répète d'une façon séquentielle. Afin, d'obtenir une bonne performance de contrôle lors de déploiement d'une telle méthodologie dans un VSI, des modèles appropriés du convertisseur et du filtre sont nécessaires.

## Chapitre IV. Commande prédictive

En particulier, le VSI triphasé à deux niveaux illustrés sur la figure 4.13. Est la topologie de convertisseur la plus basique et la plus utilisée dans les MRs. On peut voir sur la figure 4.13. Qu'un filtre LC est connecté à la sortie des bornes de VSI.

Le VSI sera modélisé ici en utilisant la transformation orthogonal de Clarke ( $\alpha\beta$ ); puisque nous supposons qu'on a des conditions équilibrées, les composantes de séquence zéro sont négligées dans ce modèle particulier.

A cet effet, toutes les tensions triphasées génériques de tension  $v$  et du courant  $i$  données en abc, peuvent être transformées en  $\alpha\beta$ , en appliquant une amplitude invariante de transformation de Clarke comme suit :

$$\bar{v} = v_\alpha + jv_\beta = T [v_a \ v_b \ v_c]' \quad (4.1)$$

$$\bar{i} = i_\alpha + ji_\beta = T[i_a \ i_b \ i_c]' \quad (4.2)$$

Avec  $T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$  est la matrice de transformation d'amplitude invariante.

La configuration des commutateurs est comme illustrée précédemment pour le contrôle du courant de VSI.

### 4.7.1 Filtre LC

Un filtre LC triphasé est raccordé aux bornes de sortie du convertisseur pour supprimer les harmoniques de commutations. Chaque branche du filtre comprend une inductance  $L_f$  et une résistance en série  $R_f$ , et un condensateur à capacité  $C_f$ . Le courant de l'inductance  $i_f$  circule à travers l'inductance  $L_f$  et le condensateur  $C_f$ .

Les variables d'états de ce système sont: le courant d'induction ainsi que la tension du condensateur  $v_f$ ; ils sont des équations de deuxième ordre.

En supposant que les valeurs des paramètres sont égales dans les trois phases, les équations mathématiques peuvent être décrites comme suit :

$$L_f \frac{di_f}{dt} = \bar{v}_i - \bar{v}_c - R_f \bar{i}_f \quad (4.24)$$

## Chapitre IV. Commande prédictive

Où  $\bar{v}_i$  est l'une des tensions possibles indiquée dans le tableau 4.1 mentionné dans la section précédente.

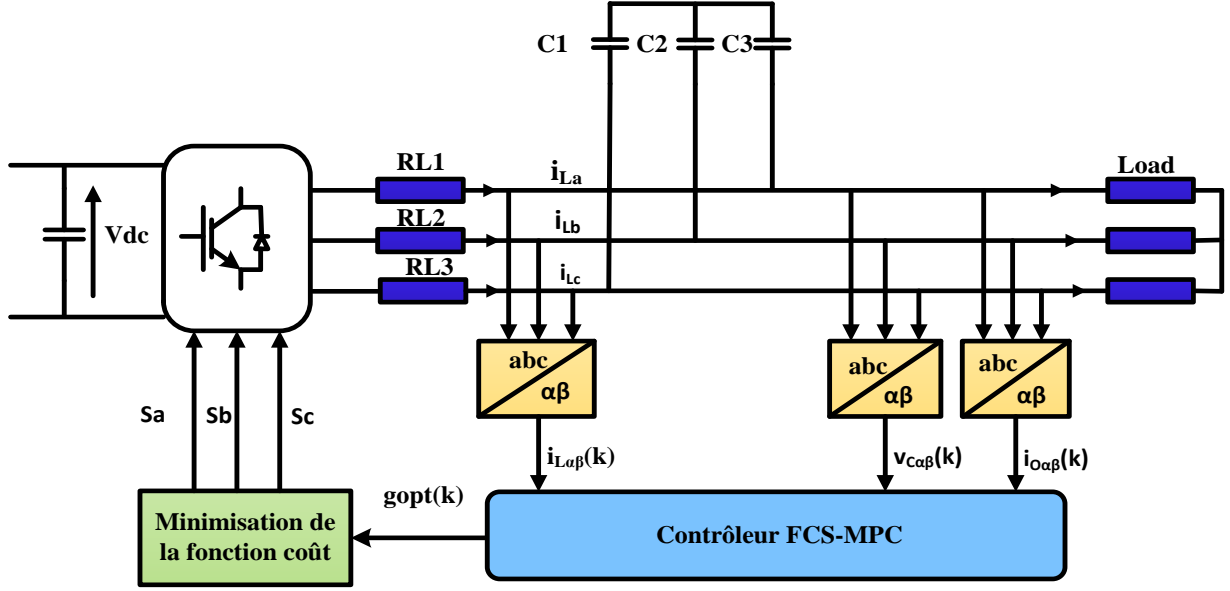


Figure 4.13 : Schéma fonctionnel de la commande FCS-MPC.

D'autre part, le comportement dynamique de la tension à travers le condensateur du filtre est défini par l'équation :

$$C_f \frac{\bar{v}_c}{dt} = \bar{i}_f - \bar{i}_o \quad (4.25)$$

Où  $\bar{i}_o$  est le courant de sortie qui doit être mesuré ou estimé [103]. Par commodité, les équations (4.24) et (4.25) peuvent être exprimées sous forme de l'espace d'état par :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i}_f \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \bar{i}_f \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \bar{v}_i \\ \bar{i}_o \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Le modèle discret d'espace d'état (4.28) est obtenu, utilisant la méthode de bloqueur d'ordre zéro (ZOH). Sachant que les GDs donnent une tension constante au bus de liaison  $V_{dc}$ , le convertisseur de puissance a des entrées statiques qui sont définies par huit valeurs de tensions  $v_i$ .

La discrétisation par la méthode ZOH est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_f(k+1) \\ \bar{v}_c(k+1) \end{bmatrix} = A_d \begin{bmatrix} \bar{i}_f(k) \\ \bar{v}_c(k) \end{bmatrix} + B_d \begin{bmatrix} \bar{v}_i(k) \\ \bar{i}_o(k) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$\text{Où} \quad A_d = e^{AT_s} \quad B_d = \int_0^{T_s} e^{A\tau} B d\tau \quad (4.29)$$

$T_s$  est le temps d'échantillonnage. Ces équations sont utilisées pour calculer la prédiction des tensions et des courants de filtre pour chaque tension d'entrée possible. Le choix de la tension d'entrée optimale dépend de l'évaluation de FC, et donc les nouveaux états de commutation sont appliqués au convertisseur pour le temps d'échantillonnage suivant.

#### 4.7.2 Conception de l'algorithme FCS-MPC

Le schéma fonctionnel de la commande prédictive (FCS-MPC) est illustré sur la figure 4.13. L'onduleur de source de tension (VSI) peut générer huit vecteurs de tension possibles  $\bar{v}_i$  qui va transformer en  $\alpha\beta$ . Chacun de ces vecteurs comprend un ensemble spécifique de valeur de tension,  $\bar{v}_{i\alpha}$  et  $\bar{v}_{i\beta}$  qui sont appliqués comme entrées au filtre LC correspondant. La tension de sortie  $\bar{v}_{c\alpha}$  et  $\bar{v}_{c\beta}$  définissent la propagation de la tension de sortie de condensateur  $\bar{v}_c$  du filtre.

Par conséquent, l'objectif principal du contrôle est de sélectionner successivement le vecteur d'entrée de tension  $\bar{v}_i$  de telle sorte que  $\bar{v}_c$  suive la trajectoire de tension de référence  $v_c^*$  avec une erreur minimale.

Le processus de mesure de nouvelles variables de retour est de prédire de nouveau comportement du système et optimiser les performances de la FC, qui est répétée pendant chaque intervalle d'échantillonnage et un vecteur correspondant à une valeur minimale de FC est appliqué au VSI.

#### 4.7.3 La fonction coût (FC)

La conception d'une FC est l'élément fondamental de la méthodologie de FCS-MPC. Une FC qui couvre un horizon de prévision de N pas du temps et en plus la régulation de la tension est maintenu en même temps. Dans ce système la FC est donnée par :

$$g_v = (v_{c\alpha}^*(k+1) - v_{c\alpha}(k+1))^2 + (v_{c\beta}^*(k+1) - v_{c\beta}(k+1))^2 \quad (4.30)$$

L'utilisation de la FC dans (4.30) peut donner lieu à un rendement satisfaisant pour les systèmes du premier ordre, mais le couplage entre les variables d'état rend les performances quelque peu

## Chapitre IV. Commande prédictive

instable pour les systèmes du deuxième ordre [105]. Ce qui nécessite l'ajout des termes dans la FC; qui sont définis par :

$$h_{lim}(i) + \lambda_u s\omega^2(i) \quad (4.31)$$

$h_{lim}$  impose des contraintes sur les courants. Tandis que  $s\omega^2$  pénalise l'effort de commutation qui peut être contrôlé par le facteur de pondération associé  $\lambda_u$ . Ces termes sont définis par :

$$h_{lim}(i) = \begin{cases} 0 & \text{if } |\bar{i}_f| \leq i_{max} \\ \infty & \text{if } |\bar{i}_f| \geq i_{max} \end{cases} \quad (4.32)$$

$$s\omega(i) = \sum |u(i) - u(i - 1)| \quad (4.33)$$

En particulier, six courant ( $i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}, i_{oa}, i_{ob}, i_{oc}$ ) et trois tensions  $v_{fa}, v_{fb}, v_{fc}$  sont utilisés et

La FC devient :

$$g_{der} = (c_f \omega_{ref} v_{f\beta}^* - i_{f\alpha} + i_{o\alpha})^2 + (c_f \omega_{ref} v_{f\alpha}^* + i_{f\beta} - i_{o\beta})^2 \quad (4.34)$$

$$g = g_v + \lambda_d g_{der} + h_{lim} + \lambda_u s\omega^2 \quad (4.35)$$

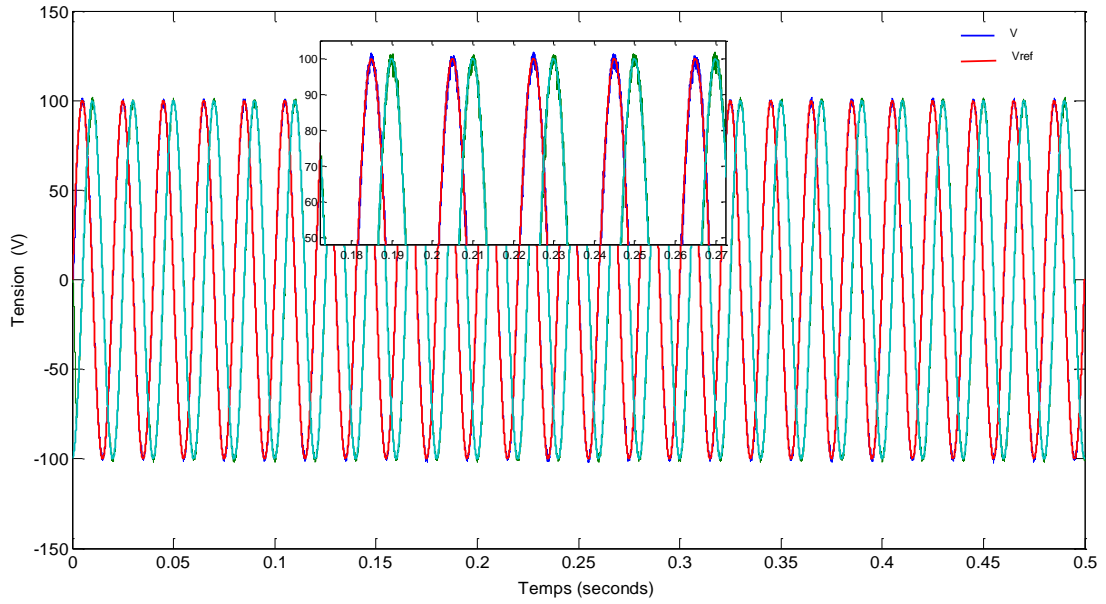
### 4.7.4 Résultats et discussions

La commande prédictive était appliquée dans cette section pour la régulation de la tension à la sortie de l'onduleur DC/AC qui interface un MR en mode d'îlotage avec une charge linéaire. Les paramètres de simulation sont donnés sur le tableau 4.3; Et les résultats de simulation sont présentés sur les figures ci-après.

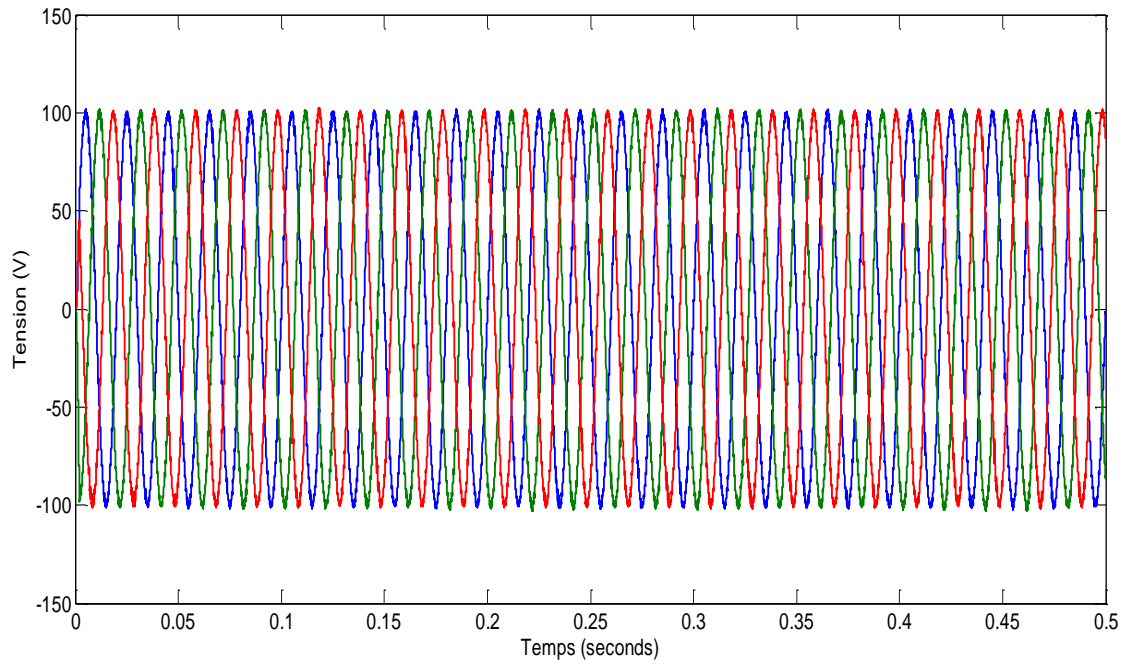
Paramètres	Valeurs
$V_{dc}$	380 V
Résistances de filtre R ( $R_1, R_2, R_3$ )	0.05 $\Omega$
Inductance du filtre L ( $L_1, L_2, L_3$ )	2.5 mH
$T_s$	25 $\mu s$
Capacité de filtre C ( $C_1, C_2, C_3$ )	25 $\mu F$
Charge linéaire	25 $\Omega$

**Tableau 4.3 : Paramètres de simulations**

## Chapitre IV. Commande prédictive



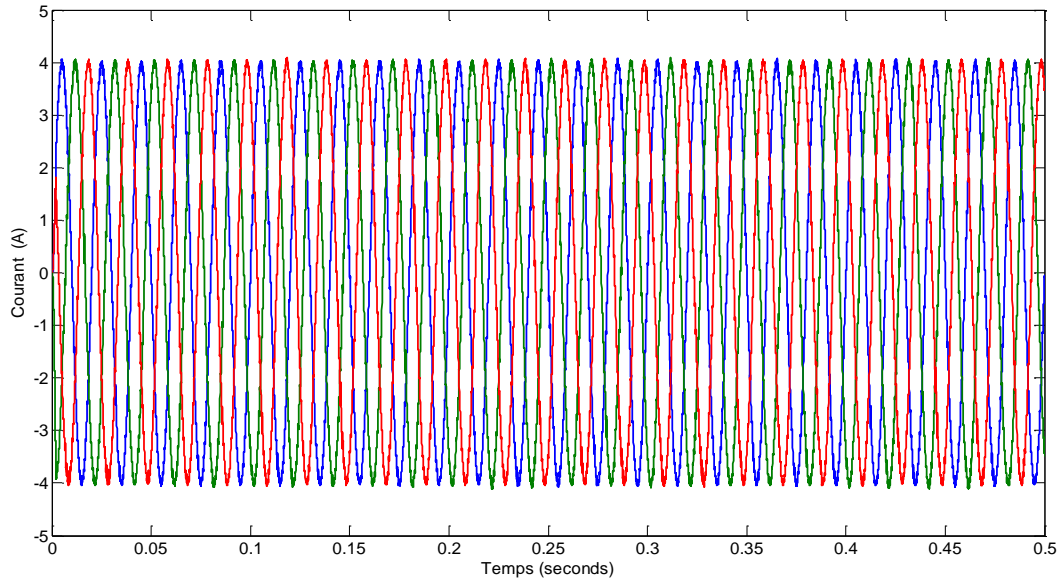
**Figure 4.14.a : Tension de sortie et sa référence.**



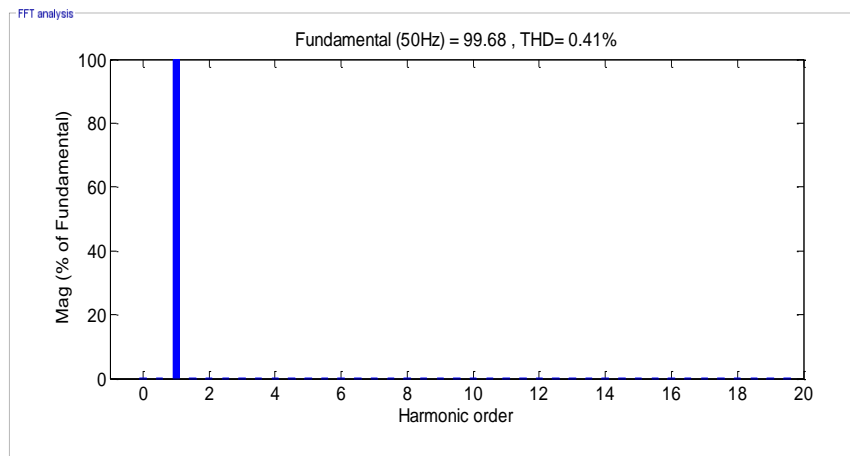
**Figure 4.14.b : Tension de sortie de l'onduleur.**



## Chapitre IV. Commande prédictive



**Figure 4.14.c : Courant de la charge.**



**Figure 4.15 : distorsion harmonique.**

On peut voir sur la figure 4.14.a que la tension suit parfaitement sa trajectoire de référence avec le moins d'harmoniques, ainsi que le courant de charge.

## Chapitre IV. Commande prédictive

La commande FCS-MPC proposée dans cette section pour la régulation de la tension de sortie de l'onduleur raccordé à un DC MR en mode autonome avec une modification simple et intuitive de la commande FCS-MPC conventionnelle pour le convertisseur triphasé à deux niveaux avec un filtre de sortie LC, qui permet un suivi explicite et parfait de la dérivée de la trajectoire de tension du condensateur. Cette modification permet d'améliorer significativement les performances de suivi de trajectoire de convertisseur par rapport à la référence pour les charges linéaires, tout en ne s'appuyant que sur une prédiction à un pas.

### 4.8 Comparaison entre la commande FCS-MPC et les commandes classiques

Une évaluation des principes de fonctionnement entre les commandes de courant classiques et la commande de courant prédictive est présentée. Bien que le contrôle prédictif soit basé sur une théorie de contrôle plus avancée, la stratégie de contrôle qui n'est pas plus complexe que le contrôle classique basé sur un contrôleur PI et SVM (space vector modulation). Les deux schémas de commande ont besoin d'un modèle d'onduleur et des vecteurs de tension. Dans le schéma classique, la connaissance des vecteurs de tension est utilisée pour la mise en œuvre de modulateur. Alors que dans le contrôle prédictif, ces vecteurs de tension sont l'ensemble fini d'actionnements possibles. Afin d'ajuster les régulateurs PI, un modèle linéaire de la charge est nécessaire, alors que le contrôleur prédictif calculera les prédictions pour chaque vecteur de tension à l'aide d'un modèle en temps discret de la charge, qui n'a pas besoin d'être linéaire. La performance des régulateurs PI dépend du réglage approprié de leurs paramètres  $K_p$  et  $K_i$ , dans le schéma de contrôle prédictif, il n'y a pas de paramètres à ajuster, mais la fonction de coût doit être définie.

Dans ce qui suit on va citer les caractéristiques des commandes classiques linéaires en temps continu et la commande prédictive :

Les caractéristiques des commandes classiques peuvent conclure en :

- le modulateur explicite est une condition préalable essentielle à la mise en œuvre des techniques de contrôle linéaire continu.
- la raison principale : le modulateur se comporte (presque) comme une fonction de transfert linéaire dans une gamme de basses fréquences.

La régulation linéaire est la régulation continue la plus répandue en raison de ses avantages :

## Chapitre IV. Commande prédictive

- Théorie bien établie : Des performances dynamiques quantifiables avec précision.
- La fréquence de commutation fixe conduit à un spectre harmonique concentré à la sortie du convertisseur : Conception de filtres analytiques et pas d'excitations de résonance surprenantes.

Cependant, le contrôle linéaire présente aussi les inconvénients généraux suivants :

- Sensible aux variations de paramètres et aux non-linéarités (ex: passage en basse tension).
- Les contraintes ne peuvent pas être intégrées dans la conception du contrôle (saturations).
- Largeur de bande de la boucle de régulation la plus rapide limitée par le modulateur échantillonnage/commutateur - la boucle la plus rapide limite la boucle extérieure, etc.
- Le couplage entre variables contrôlées est inévitable.

Les caractéristiques de la commande prédictive sont résumées dans :

- Concept simple et intuitif.
- Flexibilité de conception d'une commande multi variable (il suffit d'intégrer dans la fonction de coût).
- Fusionne le contrôle et la modulation en un seul étage.
- Adapté à la mise en œuvre numérique.

Il a des performances transitoires similaires à celles d'un contrôle d'état optimal, cependant qu'il est beaucoup plus robuste.

- Un taux d'échantillonnage élevé peut également donner d'excellentes performances en régime permanent.
- Commande découplée dans un cas multi-variables.
- Traitement simple des limitations et autres non-linéarités.
- Compensation directe des retards de calcul.
- Extrême robustesse aux variations de paramètres.
- Fréquence de commutation variable.

### 4.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une stratégie de contrôle pour un DC-MR à ressources multiples. La commande FCS-MPC a été utilisée pour contrôler le courant de sortie de l'onduleur connecté au réseau afin d'obtenir une forme sinusoïdale ; ainsi que le contrôle de la tension à la sortie de l'onduleur en mode autonome avec une charge linéaire. Le résultat obtenu permet d'introduire cette méthode de contrôle dans le domaine de l'électronique de puissance, spécialement dans les MRs. Alors que, la méthode de contrôle prédictif du courant et de la tension est expliquée en détail. Les résultats de simulation montrent que la méthode proposée présente une bonne performance pour le contrôle du courant de charge et la tension avec une bonne réponse dynamique. Enfin, l'étude proposée montre la capacité de la commande découplée de grandeurs électriques telles que le courant par rapport à les commandes classiques comme le régulateur PI.

### 5.1 Introduction

Le développement des systèmes d'alimentation électriques a vu une croissance rapide ces dernières décennies, ce qui nécessite des solutions pour résoudre les problèmes liés à la non linéarité et la complexité des systèmes de production d'énergies. Sous certaines conditions, un comportement chaotique peut se produire sous forme d'irrégularité électromécanique et constitue une menace pour la sécurité et la stabilité de réseau électrique.

Les phénomènes chaotiques sont inévitables dans les systèmes électriques, de plus leur étude fournit une nouvelle façon pour la théorie du contrôle de l'électronique de puissance en l'avenir prévisible qui va enrichir la construction des réseaux électriques intelligents. La recherche sur le chaos et l'un des principaux aspects de la non-linéarité et l'instabilité des systèmes de production et d'alimentation électrique ; Jusqu'à présent l'étude est toujours en cours de réalisation et il y'a beaucoup de problèmes à régler.

Dans ce chapitre, on présente le contrôle et la synchronisation des systèmes des sources d'énergies que présente une station de production en chine, ainsi qu'un autre système avec un comportement hyper chaotique. En premier lieu, la description de la dynamique d'un système donné sous forme d'un modèle mathématique exprimé en termes de variables d'état et d'équations d'évolution, est abordée. Puis quelques concepts liés à la notion de stabilité et à la description analytique du diagramme de bifurcation seront présentés, ainsi que les outils utilisés pour l'analyse des systèmes chaotiques seront détaillés. On introduira en particulier, les points d'équilibre, les exposants de Lyapunov, l'espace des phases, l'attracteur étrange, la section de Poincaré et le diagramme de bifurcation. En fin, La méthode de contrôle prédictif était appliquée pour la stabilité et la synchronisation de ce système. Une conclusion est donnée en fin du chapitre.

### 5.2 Définitions et propriétés de base

#### 5.2.1 Systèmes dynamiques

Un système dynamique est une description directe du comportement complexe d'un phénomène naturel ou scientifique. Il indique l'évolution de l'état du phénomène ou du système réel dans le temps. Il existe deux classes de systèmes dynamiques : les systèmes dynamiques discrets et les systèmes dynamiques continus.

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

Soit l'ensemble de variables appelées variables d'état :

$$X = \{x_j; j = 1, 2, \dots, K, n\} \quad (5.1)$$

Cet ensemble de variables permet de définir entièrement l'état instantané du système dans un espace appelé espace d'états. Variables d'état et espace des états sont également fréquemment appelés degrés de liberté et espace des phases. Le nombre de composantes de  $x$ , noté  $n$ , représente la dimension du système.

### ➤ Systèmes dynamiques discrets

La règle d'évolution d'un système discret, est une itération de la forme :

$$X_{k+1} = G(X_k, k) \quad (5.2)$$

Où  $G$  est une fonction continue définissant la dynamique du système et  $x$ , le vecteur d'état.

### ➤ Systèmes dynamiques continus

Pour un système continu, on utilise un système d'équations différentielles :

$$\frac{d}{dt}X = F(X, t) \quad (5.3)$$

Où  $F$  représente la fonction qui définit la dynamique du système continu.

### 5.2.2 Systèmes non linéaires

Un système est dit linéaire s'il relève du principe de superposition, c'est-à-dire si à la somme de deux excitations correspond la somme des deux réponses correspondantes.

Un système non linéaire est un système qui ne vérifie pas le principe de superposition. Son comportement est décrit par des équations différentielles non linéaires.

### 5.2.3 Systèmes déterministes

Soit  $U$  l'ensemble des conditions initiales et  $x_0 \in U$ . Alors, si pour tout  $x_0$ ,  $X(t, x_0)$  existe et est unique, le système est dit déterministe. En d'autres termes, c'est un système pour lequel il est possible de prévoir son évolution au cours du temps.

## 5.3 Caractéristiques principales des systèmes dynamiques non linéaires

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

Tout système dynamique non linéaire est stationnaire sur l'un des comportements suivants :

- Etat d'équilibre ; que se soit un point fixe ou une solution périodique.
- Etat chaotique.

### 5.3.1 Point fixe ou point d'équilibre

La recherche d'un point d'équilibre signifie la recherche d'une solution stationnaire qui ne présente pas d'évolution temporelle. Un point d'équilibre est donc un point où le système peut rester indéfiniment, s'il n'est pas excité. Contrairement à un système linéaire, un système non linéaire peut avoir plusieurs points d'équilibre.

Pour un système discret, les points d'équilibre sont obtenus en résolvant l'équation:

$$X(k + 1) = X(k) \quad (5.4)$$

Pour un système continu, les coordonnées des points d'équilibre sont obtenues en résolvant:

$$X(t) = F(X, t) = 0 \quad (5.5)$$

Un point d'équilibre correspond à un point fixe dans l'espace d'état. Il n'est pas nécessairement stable, mais lorsqu'il l'est, ce point représente un attracteur.

### 5.3.2 Solution périodique

Soit  $X(t, x_0)$  la solution d'un système dynamique, elle représente une solution périodique si elle est définie telle que :

$$\exists T \neq 0 \mid \forall t, X(t + T, x_0) = X(t, x_0) \quad (5.6)$$

$T$  représente la période.

L'ensemble limite correspondant à cette solution est une courbe fermée dans l'espace de phase. Si l'espace de phase est de dimension 2, la solution périodique sera un cercle, une ellipse, ou toute autre forme géométrique fermée.

### 5.3.3 Le chaos

La théorie du chaos est utilisée pour décrire et expliquer les divers processus qui se produisent dans les systèmes complexes.

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

Par exemple l'atmosphère, les processus aérodynamiques [106], les processus chimiques [107] et les processus de l'information et de la communication.

Dans ces contextes le chaos est utilisé pour caractériser la capacité des systèmes dynamiques non-linéaires à produire un changement imprévisible dans le comportement à grande échelle ou à un changement soudain dans la configuration du système, en réponse à un changement très petit dans les conditions initiales.

Une solution chaotique est un comportement asymptotique borné qui n'est ni un point d'équilibre ni une solution périodique. Le chaos peut donc être défini par défaut des autres types de solutions sachant qu'il n'existe pas de définition à la fois formelle et générale du chaos.

Pratiquement, une dynamique chaotique peut être identifiée, en première analyse, par la reconnaissance de propriétés caractéristiques à savoir : sensibilité aux conditions initiales, attracteur étranges, mélange,...etc. Ces propriétés sont principalement responsables de la formation de structures fractales des propriétés chaotiques au sein d'un système complexe. D'autre part, la structure fractale aboutissant à un « bâtiment à énergie positive » au sein des réseaux intelligents et plus une structuration artificielle visant à faciliter l'électricité.

La gestion des flux est un résultat émergent d'une évolution chaotique. Cependant même si les modèles de réseaux intelligents seront principalement caractérisés par une structuration « artificielle » ; certaines auto-similarité périodique quotidienne ou saisonnières par exemple dans le comportement de consommation d'énergie entre bâtiment et les réseaux intelligents de quartier, sont susceptibles de survenir dans la manifestation de comportement chaotique.

D'abord, nous présentons quelques caractéristiques importantes du chaos, puis nous présentons les méthodes du contrôle des systèmes chaotiques.

### ➤ **Sensibilité aux conditions initiales**

C'est la caractéristique essentielle de ce type de comportement dynamique : deux systèmes chaotiques identiques, partant de conditions initiales différentes, si proches soient-elles, voient leurs trajectoires respectives se séparer de manière exponentielle.

Une erreur  $\varepsilon_0 > 0$  sur la condition initiale va évoluer exponentiellement, et à un instant donné  $t$ , l'erreur sera égale à :



$$|\varepsilon(t)| = \varepsilon_0 e^{\lambda t} \quad (5.7)$$

Où  $\lambda$  s'appelle l'**exposant de Lyapunov**.

### ➤ **Mélange**

A côté de la sensibilité aux conditions initiales, il existe une autre caractéristique du chaos, la présence d'un mélange.

Une façon d'interpréter le mélange est de subdiviser l'intervalle de départ en deux sous intervalles, à partir d'un sous intervalle. On peut trouver des valeurs initiales de cet intervalle qui peuvent mener, lorsque le système évolue, à des valeurs comprises dans l'intervalle cible.

### ➤ **Attracteurs étranges**

Un attracteur étrange est une représentation de la solution chaotique dans l'espace de phases. Il est formé d'une suite infinie de points  $x_0, x_1, \dots, x_n$  qui dépendent de la valeur initiale  $x_0$ . Au fur et à mesure que le nombre de points augmente, une image se forme dans le plan de phase. Cette image n'est pas une courbe ni une surface, c'est un objet constitué de points avec des espaces inoccupés, entre eux.

Un attracteur chaotique possède notamment la propriété fondamentale suivante : la trajectoire ne repasse jamais par un même état. Ce qui signifie, entre autres, que cette trajectoire passe par une infinité d'états.

## **5.4 Méthodes d'analyse des systèmes non linéaires**

Pour faire l'analyse de la dynamique des systèmes non linéaires, il existe des méthodes bien connues pour cela, parmi lesquelles nous pouvons notamment citer:

### ➤ **Les exposants de Lyapunov**

Comme les systèmes chaotiques sont très sensibles aux petites variations de leurs conditions initiales, il faut donc mesurer la vitesse à laquelle ces petites variations peuvent s'amplifier.

Le mathématicien russe Alexandre Lyapunov a travaillé sur ce phénomène et a développé une quantité permettant de mesurer la divergence possible entre deux orbites issues de conditions initiales voisines. Lorsque cette divergence évolue exponentiellement avec le temps pour presque toutes les conditions initiales voisines d'un point donné, on parle du phénomène de sensibilité aux conditions initiales.

Un système représenté par  $n$  équations d'état aura  $n$  exposants de Lyapunov, chacun entre eux mesure la vitesse de divergence selon l'un des axes du système dans l'espace de phases. Un

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

exposant négatif donne des trajectoires convergentes exponentiellement avec le temps, ce qui indique la perte d'information sur les conditions initiales, par contre un exposant positif montre que la divergence entre deux trajectoires voisines augmente exponentiellement avec le temps, il s'agit bien là d'une caractéristique d'un attracteur étrange.

Pour avoir le chaos, il faut qu'au moins un des exposants de Lyapunov soit positif, ce qui donnera une divergence suivant au moins un des axes. Mais il faut également que la somme de tous les exposants de Lyapunov soit négative.

L'exposant de Lyapunov peut être calculé par la méthode développée par Alexandre Lyapunov.

Pour un système discret, il est donné par l'expression suivante:

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left( \log \frac{df(x_k)}{dx_k} \right) \quad (5.8)$$

Pour le cas continu,

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t (\log f'(x_i)) \quad (5.9)$$

Avec

$$f'(x_i) = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_i} \quad (5.10)$$

### ➤ L'espace de phases

L'espace des phases est un outil de représentation graphique dont les axes sont les valeurs que prennent les variables d'état. Il est applicable uniquement pour des systèmes ayant au moins deux dimensions. Tout dessin dans l'espace de phases est appelé : **attracteur**.

On distingue trois types d'attracteurs; le point fixe, le cycle limite (orbite périodique) et les attracteurs chaotiques.

- Un système est dit périodique si sa représentation dans l'espace de phases donne une courbe (trajectoire) fermée appelée **orbite périodique**.
- L'espace des phases confirme le déterminisme dans les systèmes chaotiques. Il distingue entre un comportement aléatoire et un autre chaotique.

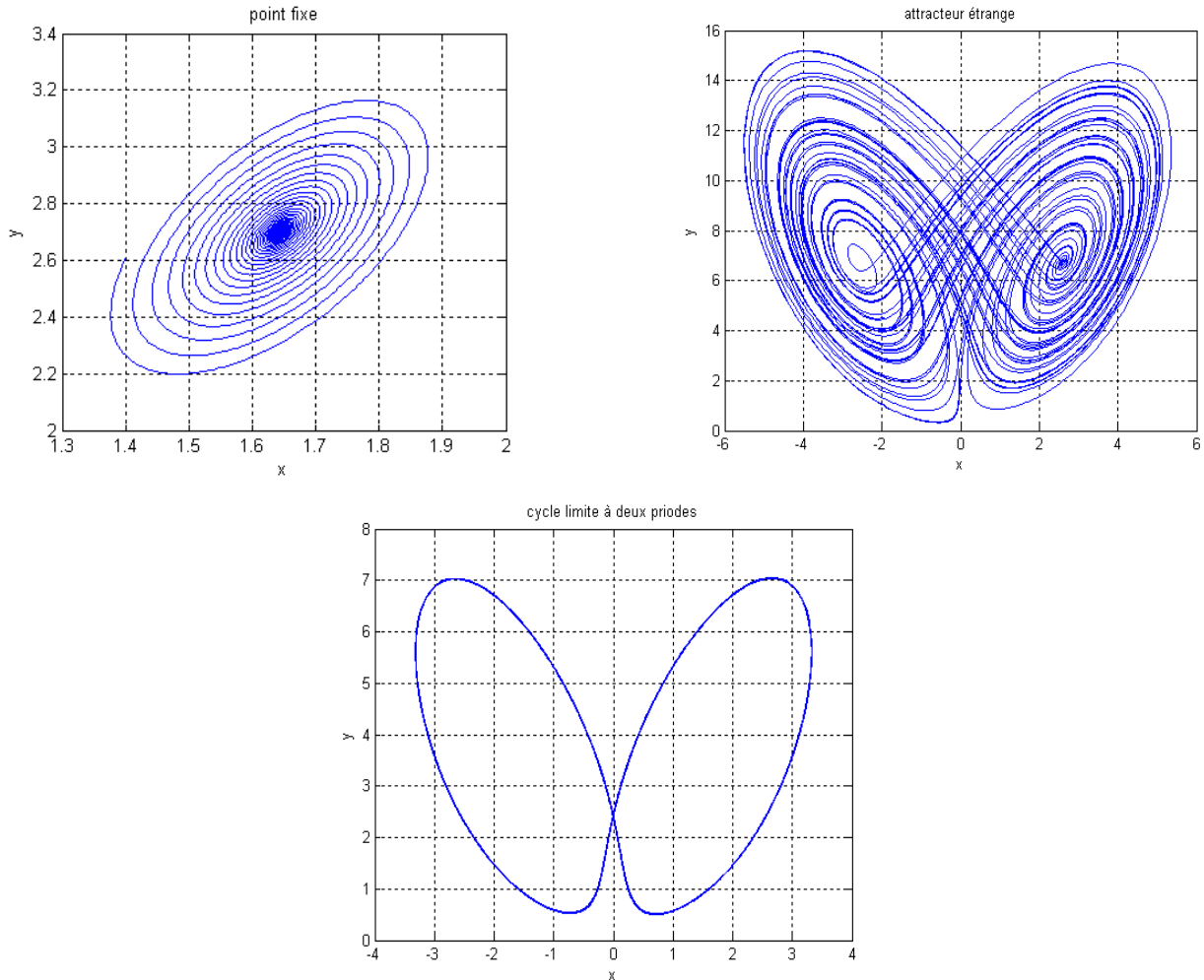
Si l'évolution est totalement aléatoire, les points apparaissent dans le plan de phases au hasard et ils ne forment aucune structure particulière.

Si l'évolution est chaotique, au début il n'y a aucune différence par rapport à celle de l'aléatoire, puis après un temps suffisamment long, le positionnement des points construit une forme

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

particulière. Cette forme, appelée **attracteur étrange** (ou **attracteur chaotique**), est le signe spécifique du chaos.

Les figures ci-après présentent les différents types d'attracteur chaotique dans l'espace de phases.



**Figure 5.1 : Les différents types d'attracteur dans l'espace de phases.**

### ➤ La section de Poincaré

La section de Poincaré consiste à couper la trajectoire dans l'espace de phases, en définissant les intersections de cette trajectoire entre un plan en dimension trois et une droite en dimension deux. On passe alors d'un système dynamique à temps continu à un système à temps discret, tout en conservant les propriétés du système. La section utilisée pour couper l'attracteur dans le plan de phase est choisie d'une manière arbitraire. Mais la plus utilisée est celle qui est formée de maxima d'une des variables d'état, ou des minima ou bien des deux en même temps.

### ➤ Le diagramme de bifurcation

Si les paramètres d'un système non linéaire changent, la stabilité et le nombre de ses points d'équilibre peuvent changer. Les valeurs par lesquelles la nature de la trajectoire du système change sont appelées : valeurs critiques de bifurcation.

Le diagramme de bifurcation est un outil graphique qui permet d'observer l'évolution de la solution dynamique du système en fonction de la valeur d'un paramètre du système, appelé : **paramètre de bifurcation**. Un tel diagramme permet d'avoir une vision globale de la succession des états du système.

Par exemple si on considère le diagramme de bifurcation en fonction du paramètre  $c$  donné par la figure (5.2), on remarque que pour:

- $c \in [1, 2.77]$  le système présente un cycle limite à une orbite périodique.
- $c \in [2.77, 3.82]$  le système présente un cycle limite de deux périodes.
- $c \in [3.82, 4.16]$  le système présente un cycle limite de quatre périodes.
- $c \in [4.16, 10]$  le système présente un comportement chaotique.

Sur le dernier intervalle, nous distinguons deux espaces blancs correspondent à des zones où le système se stabilise sur des orbites périodiques.

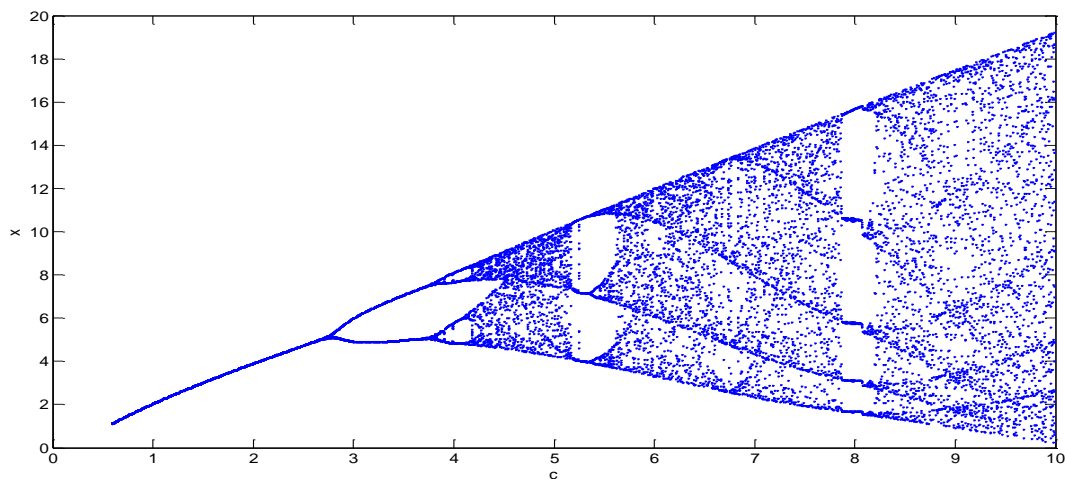


Figure 5.2 : Diagramme de bifurcation.

### 5.5 Exemples des systèmes chaotiques

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

Pour mieux illustrer l'ensemble des notions présentées précédemment, nous présentons dans ce qui suit des exemples d'analyse du comportement de systèmes non linéaires discrets et continus.

### 5.5.1 Exemple des systèmes discrets

On considère l'équation logistique décrite par l'expression suivante:

$$x_{k+1} = rx_k(1 - x_k) \quad (5.11)$$

Avec  $r$  le paramètre de bifurcation.

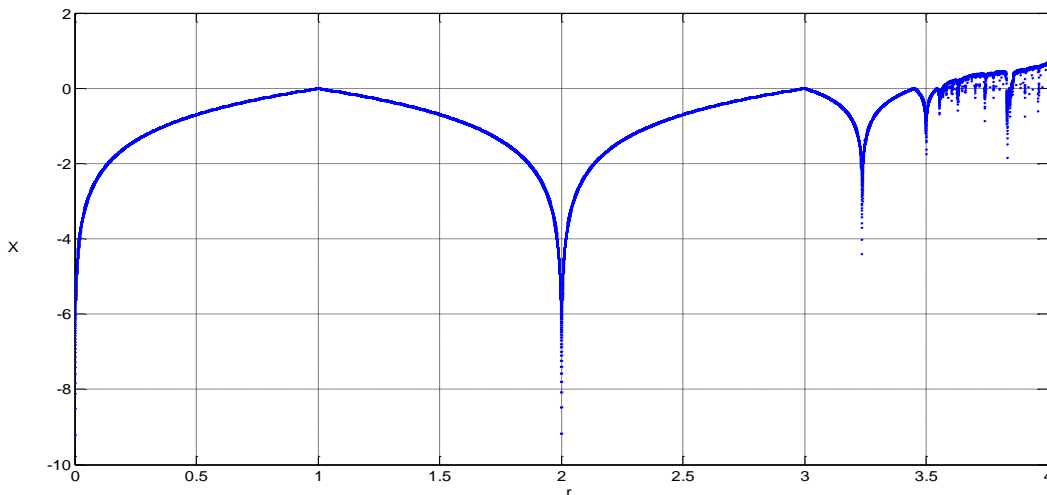
Les points d'équilibre sont obtenus en résolvant l'équation :  $x_{k+1} = x_k$ .

La résolution de deux points d'équilibre :  $x_{e_1} = 0$  et  $x_{e_2} = 1 - \frac{1}{r}$

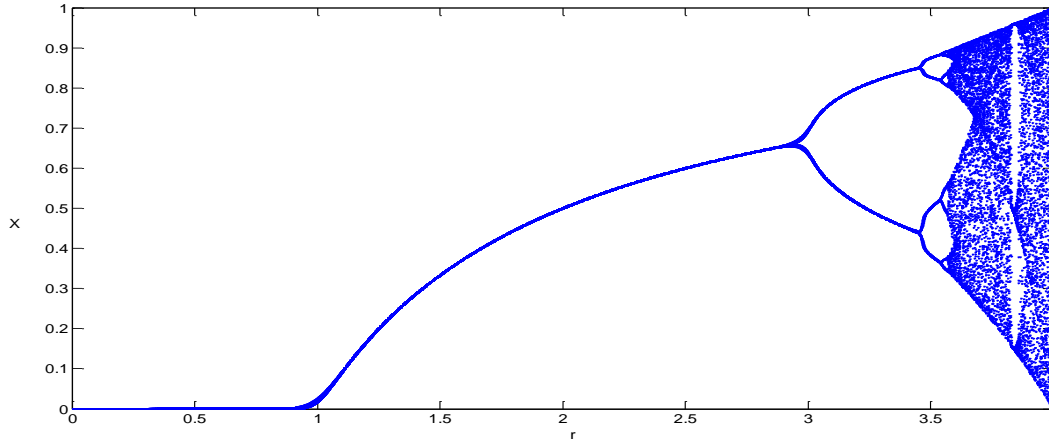
Le calcul de l'exposant de Lyapunov est effectué en fonction du paramètre  $r$ . Le résultat obtenu est représenté par la figure (5.3).

Les valeurs de  $r$ , pour lesquelles l'exposant de Lyapunov est égal à zéro, correspondent au changement qualitatif au niveau du comportement de système (points de bifurcation). D'après la figure (5.3), on peut conclure que le système devient chaotique à partir de  $r$  égal à 3.6, puisque pour cette valeur, on note un changement de signe de l'exposant de Lyapunov qui devient positif.

Le diagramme de bifurcation en fonction du paramètre  $r$ , est celui de la figure 5.4.



**Figure 5.3 : L'exposant de Lyapunov de l'équation logistique.**



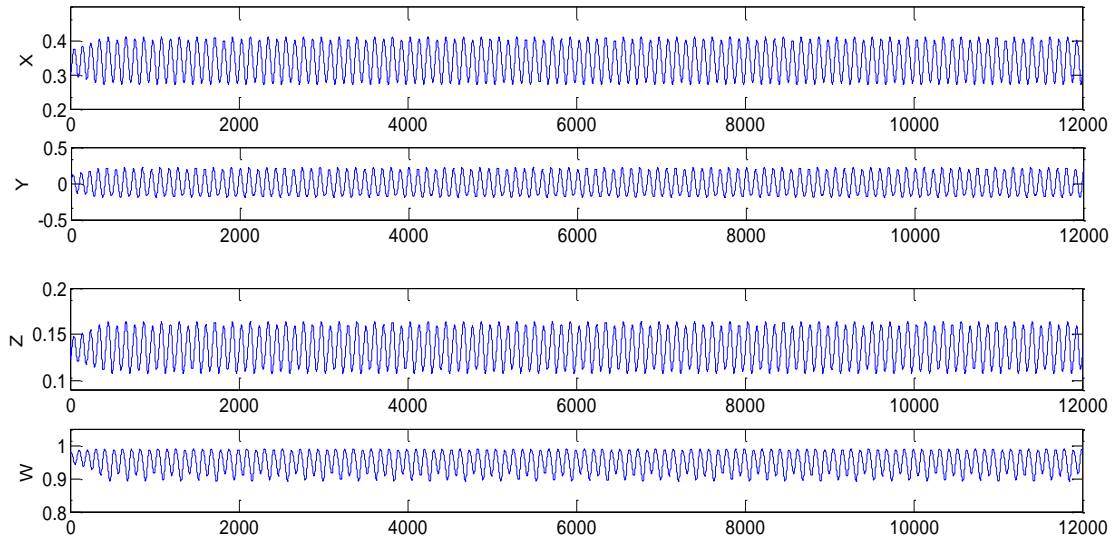
**Figure 5.4 : Diagramme de bifurcation de la fonction logistique.**

### 5.5.2 Le chaos dans les réseaux électriques

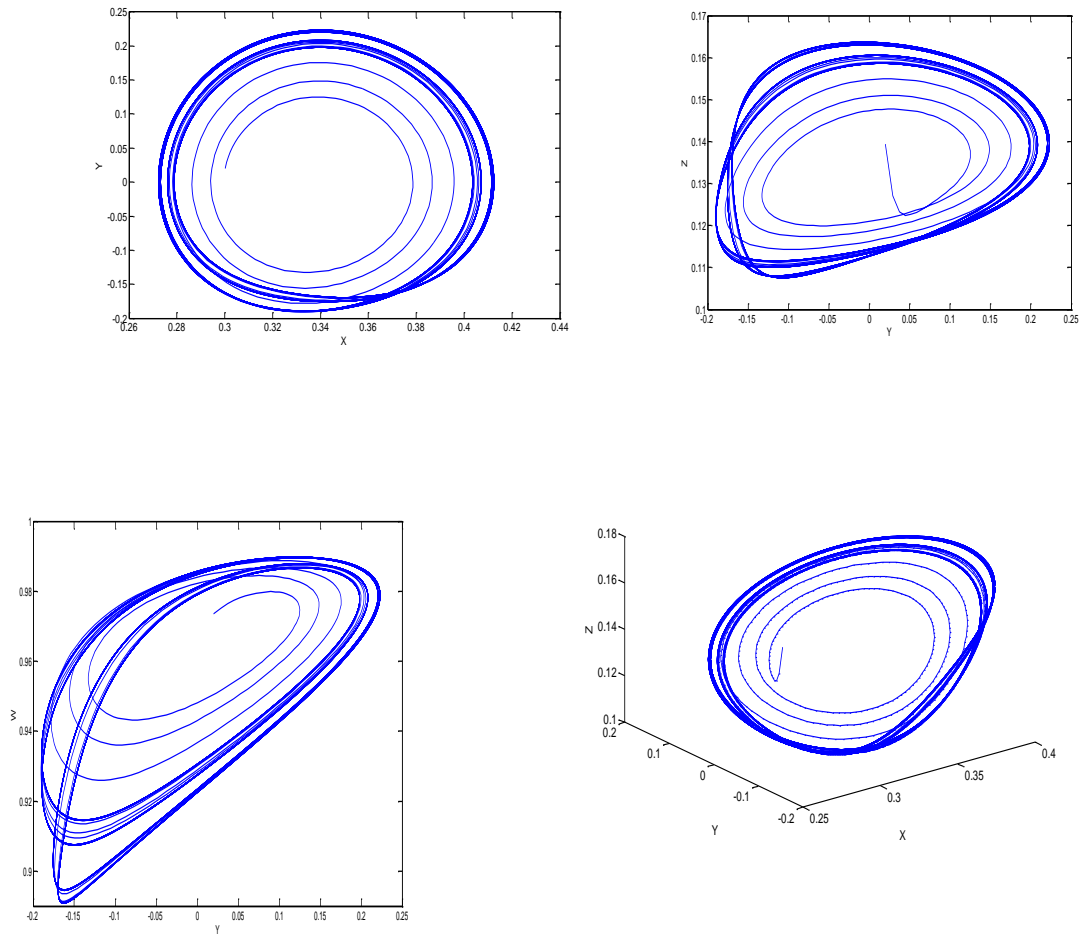
L'oscillation chaotique dans un réseau électrique est considérée comme la cause principale des pannes du courant dans les grands réseaux électriques interconnectés. Divers types de problèmes de stabilité dans les réseaux électriques, tels que la chute de tension et les phénomènes oscillatoires, peut être analysée par une théorie chaotique [108]. Ces dernières décennies le comportement chaotique est apparu aux réseaux électriques intelligents [109]. Considérant le système électrique illustré à la référence [110], la charge est représentée par un moteur asynchrone en parallèle avec une charge PQ constante. Les équations différentielles de ce système est données par :

$$\begin{cases} \dot{\delta}_m = \omega. \\ \dot{\omega} = -0.1667\omega + 16.6667V\sin(\delta - \delta_m + 0.0873) + 1.8807. \\ \dot{\delta} = -666.6667V\cos(\delta - 0.2094) - 166.6667V\cos(\delta - \delta_m - 0.0873) + \\ \quad 496.8718V^2 - 93.3333V + 33.3333Q + 43.3333. \\ \dot{V} = 104.8689V\cos(\delta - 0.1346) + 26.2172V\cos(\delta - \delta_m - 0.0124) - 78.7638V^2 + \\ \quad 14.5229V - 5.2288Q - 7.0327. \end{cases} \quad (5.12)$$

Les figures 5.5 et 5.6 présentent les réponses temporelles et les portraits de phases respectivement de ce système. On peut voir clairement que les réponses temporelles de ce système et les portraits de phases présentent un comportement chaotique.



**Figure 5.5 : Réponses temporelles de système électrique.**



**Figure 5.6 : Les portraits de phases du système.**

### 5.6 Contrôle des systèmes chaotiques

Le contrôle du chaos est la stabilisation au moyen de petites perturbations du système de l'une de ces orbites périodiques instables. L'objectif est de rendre un comportement autrement chaotique plus stable et prévisible, ce qui souvent un avantage. La perturbation doit être minime par rapport à la taille totale de l'attracteur du système pour éviter une modification significative de la dynamique naturelle du système; plusieurs techniques ont été conçues pour contrôler le chaos ; mais la plupart sont le développement des deux approches de base : la méthode OGY (Ott, Greborgie et Yorke) et le contrôle de Pyragas.

Les deux méthodes nécessitent une détermination ou préalable des orbites périodiques instables du système chaotique avant que l'algorithme de contrôle puisse être conçu.

#### 5.6.1 La méthode OGY

E.Ott, C.Greborgie, et J.A.Yorke ont été les premiers à faire l'observation clé que le nombre infini d'orbite périodiques instables typiquement, incrustées dans un attracteur chaotique peuvent être exploités dans le but d'obtenir un contrôle par l'application de très petites perturbations. Après avoir fait ce point général, ils l'ont illustrés avec une méthode spécifique ; appelée la méthode OGY pour stabiliser une orbite périodique instable.

Dans cette méthode le contrôle est fait une fois par cycle pour le maintenir à proximité de l'orbite périodique instable souhaitée.

#### 5.6.2 La méthode de Pyragas

Dans la méthode de Pyragas, la stabilisation d'une orbite périodique est faite par un signal de contrôle continu approprié injecté dans le système, dont l'intensité est pratiquement nulle à mesure que le système évolue près de l'orbite périodique souhaitée, mais augmente lorsqu'il s'éloigne de cette orbite.

Ces deux méthodes font toutes deux une partie de classe générale de méthodes "en boucle fermée" ou à "rétroaction" qui peuvent être appliquées sur la base de la connaissance du système obtenu en observant uniquement le comportement du système dans un ensemble sur une période de temps appropriée.

Après ces travaux beaucoup de méthodes ont été développées pour le contrôle des systèmes chaotiques. Dans ce chapitre on s'intéresse à la commande prédictive.

#### 5.6.3 Commande prédictive



## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

La méthode proposée par Ushio et Yamamoto [111, 112] est basée sur le principe de la technique de Pyragas [113] qui propose un contrôleur dynamique à retour d'état prédictif pour les systèmes chaotiques. La loi du contrôle est calculée à partir de la différence entre l'état actuel et l'état futur du système chaotique.

Les états contrôlés par le contrôle prédictif convergeront vers les orbites stabilisés puisque les approximations ne sont pas employées dans la boucle de retour d'état qui est l'avantage de cette méthode.

Considérons le système non linéaire décrit par :

$$\dot{x} = f(x(t)) + u(t) \quad (5.12)$$

Où  $x \in R^n$  est le vecteur d'état et  $u \in R^n$  est le vecteur de contrôle. On assume que  $f$  est différentiable.

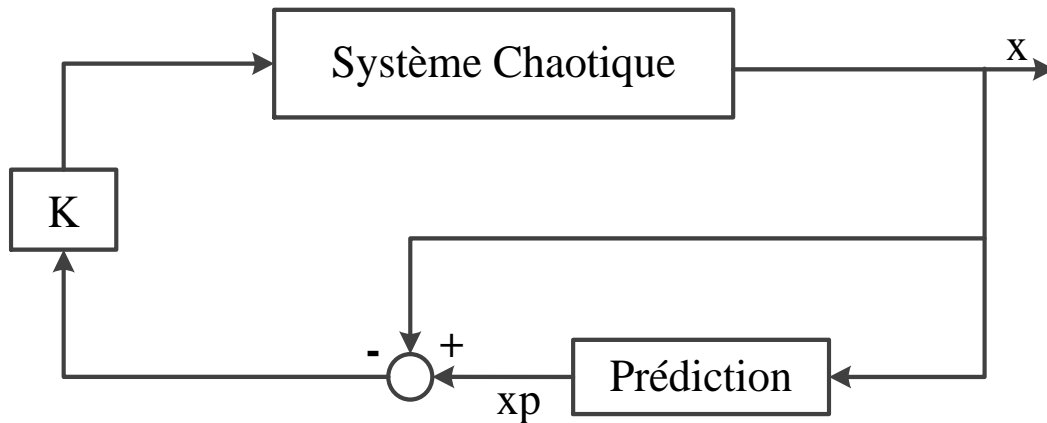
Notre objectif est de trouver un vecteur  $u(t)$  de telle sorte que la trajectoire du système (5.12) converge vers un point fixe instable  $x_f$ .

L'entrée de commande  $u(t)$  est déterminée par la différence entre l'état prédit et l'état actuel :

$$u(t) = K(x_p(t) - x(t)) \quad (5.13)$$

Où  $K$  est le gain de vecteur de contrôle,  $x_p$  est l'état prédit incontrôlé de l'état actuel  $x(t)$  du système chaotique.

Le schéma représentatif de la méthode est donné par la figure 5.7.



**Figure 5.7 : Contrôle prédictif à retour d'état.**

En utilisant la prédiction d'un pas en avant, le contrôle prédictif (5.13) devient :

$$u(t) = K(x_p - x(t)) \quad (5.14)$$

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

Près du point fixe  $x_f$ , on peut utiliser l'approximation linéaire pour le système incontrôlé comme suit :

$$(\dot{x}(t) - x_f) = A(x(t) - x_f) \quad (5.15)$$

Où  $A \in R^{n \times n}$  est la matrice Jacobienne de  $f(x(t))$  évalué aux points fixes  $x_f$ , qui est définie :

$$A = D_x f(x_f) = \left. \frac{\delta \dot{x}(t)}{x(t)} \right|_{x_f} \quad (5.16)$$

Le système contrôlé sera décrit par :

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + K(A(x(t) - x_f)) \quad (5.17)$$

L'équation (5.17) est réécrite sous la forme :

$$\delta \dot{x}(t) = A \delta x(t) \quad (5.18)$$

Avec :

$$\delta x(t) = x(t) - x_f \quad (5.19)$$

Le système contrôlé est linéarisé autour de  $x_f$  par :

$$\begin{aligned} \delta \dot{x}(t) &= A \delta x(t) + K(\delta \dot{x}(t) - \delta x(t)) = A \delta x(t) + K(A \delta x(t) - \delta x(t)) \\ &= (A + K(A - I)) \delta x(t) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Où  $I \in R^{n \times n}$  est la matrice d'identité.

Afin d'appliquer, la stratégie de contrôle prédictif proposée, nous devons déterminer le vecteur de gain  $K$  et la proximité du point fixe pour ajuster le point fixe suivant afin qu'il tombe sur le point fixe d'origine.

Le gain de retour  $K$  est déterminé par [114] :

$$|A + K(A - I)| < I \quad (5.21)$$

Et le voisinage du point fixe est donné par :

$$r(t) = |x(t) - x(t - 1)| \quad (5.22)$$

Le système contrôlé est donné par :

$$\dot{x}(t) = \begin{cases} f(x(t)) + u(t) & \text{si } r(t) < \varepsilon \\ f(x(t)) & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (5.23)$$

Avec  $\varepsilon$  est un petit nombre positif.

### 5.6.4 Application

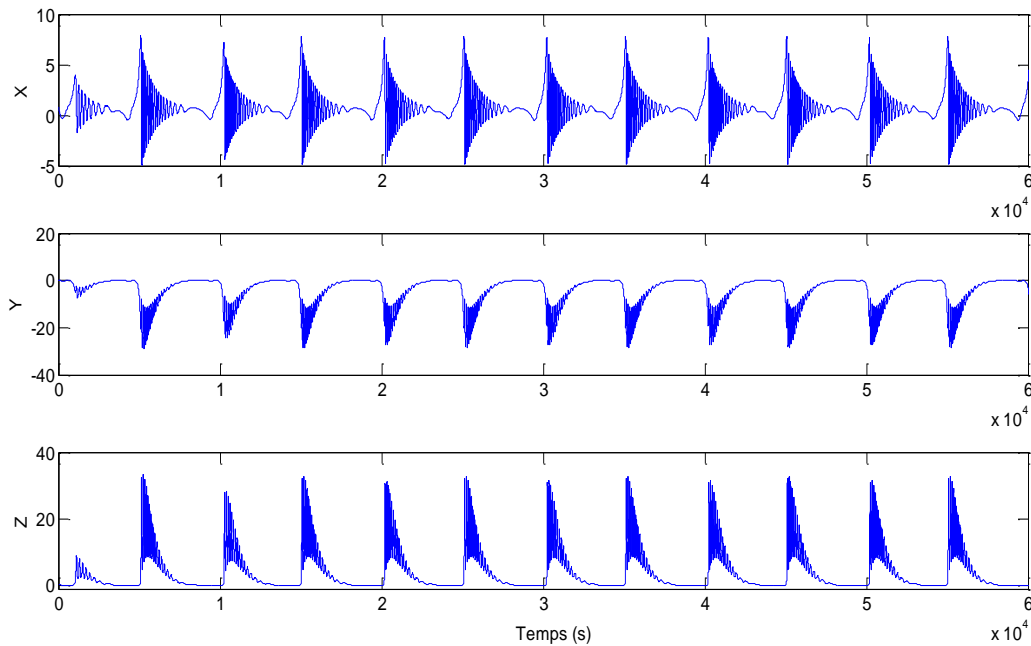
Sun et al [115,116] ont proposé un système chaotique et un autre hyper-chaotique pour analyser l'offre et la demande de ressources énergétiques dans certaines régions en Chine.

### 5.6.4.1 Système d'énergie chaotique

Le système de ressources énergétiques de trois dimensions (3-D) [115] est exprimé par l'ensemble d'équations différentielles ordinaires suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = a_1 x \left(1 - \frac{x}{M}\right) - a_2 (y + z) \\ \dot{y} = -b_1 y - b_2 z + b_3 x [N - (x - z)] \\ \dot{z} = c_1 z (c_2 x - c_3) \end{cases} \quad (5.24)$$

Les paramètres  $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, Met N$  sont choisis de telle sorte que le système (5.24) présente un comportement chaotique. Les portraits de phase de 3-Dimension et les réponses temporelles du système chaotique de ressources énergétiques sont montrés sur la figure 5.8.



a) Les réponses temporelles du système.

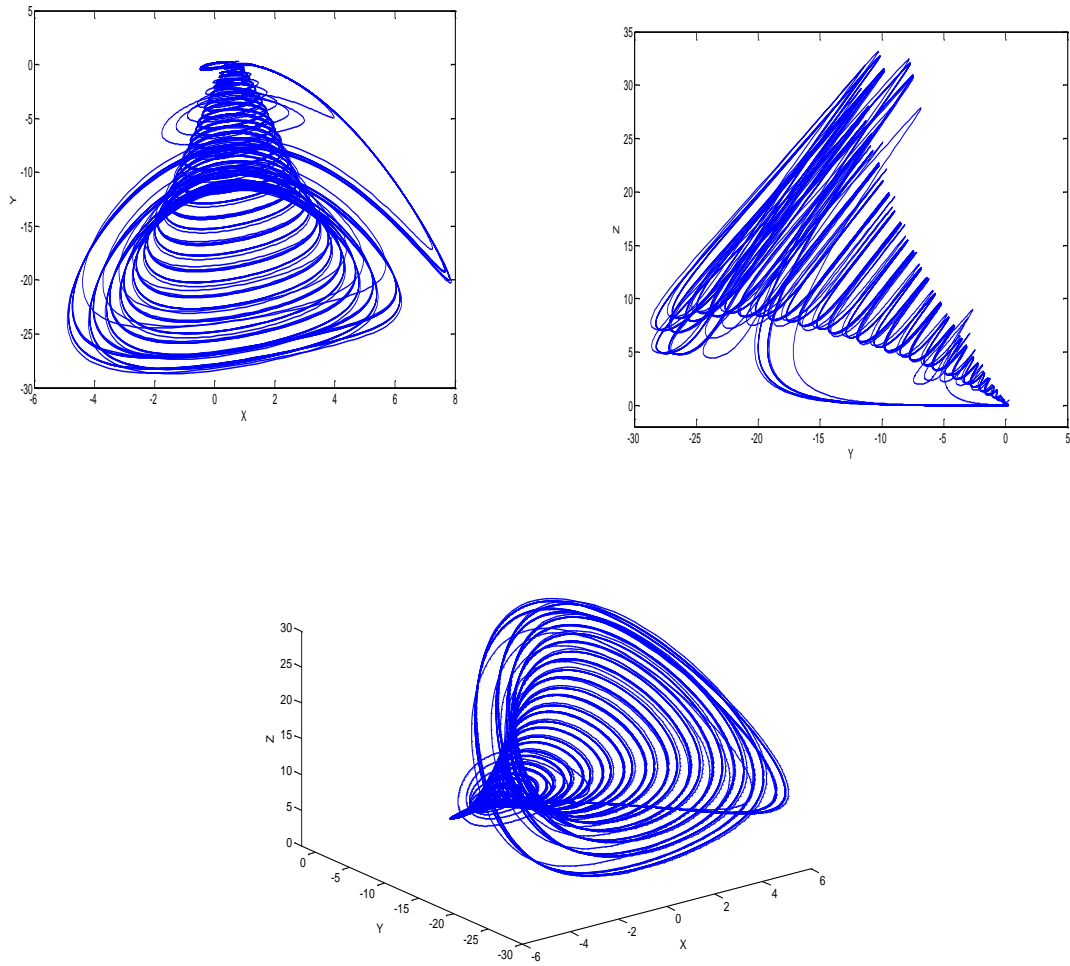


Figure.5.8 : Les réponses temporelles et les portraits de phases.

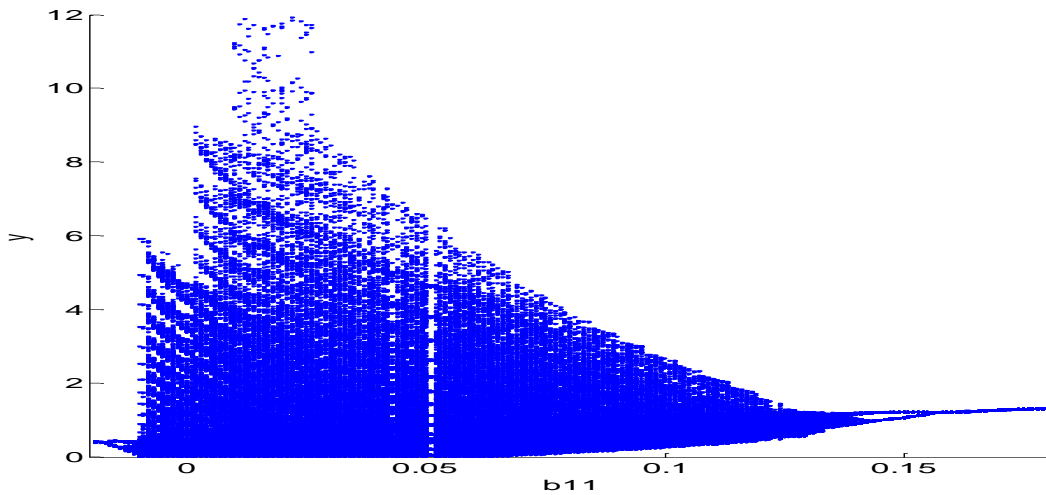
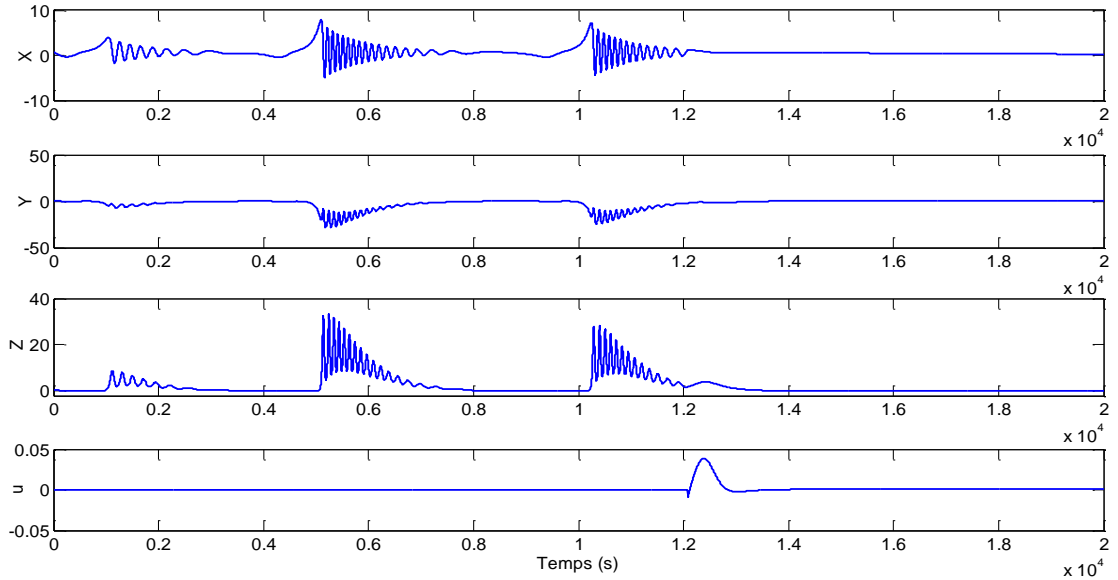


Figure.5.9 : Diagramme de bifurcation du système.

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

On remarque sur le diagramme de bifurcation que lorsque  $b_{11} \in 0.15$  le système a une orbite périodique après 0.15 le système se décompose en deux orbites périodiques puis il rentre dans le comportement chaotique.

En choisissant le vecteur de gain  $K = \text{diag}(-1,0,0)$  et à partir des conditions initiales  $x_0, y_0, z_0 = (1.8, -2.8, 2.3)$ . Les résultats obtenus suite à l'application de la loi de contrôle prédictif sont représentés par la figure 5.10.



**Figure.5.10 : Le contrôle prédictif du système.**

### 5.6.4.2 Système d'énergie hyper-chaotique

Le système hyper-chaotique de ressource d'énergie présenté dans [117] est donné par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = a_1 x \left(1 - \frac{x}{M}\right) - a_2 (y + z) - d_3 w \\ \dot{y} = -b_1 y - b_2 z + b_3 x [N - (x - z)] \\ \dot{z} = c_1 z (c_2 x - c_3) \\ \dot{w} = d_1 x - d_2 w \end{cases} \quad (5.25)$$

Où  $x(t)$  est la pénurie de ressource énergétique dans la région A,  $y(t)$  est l'augmentation de l'approvisionnement en ressource énergétique dans la région B,  $z(t)$  est la ressource énergétique importée dans la région A, et  $w(t)$  est la ressource d'énergie renouvelable dans la région A.

Les paramètres du système sont choisis comme suit :

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

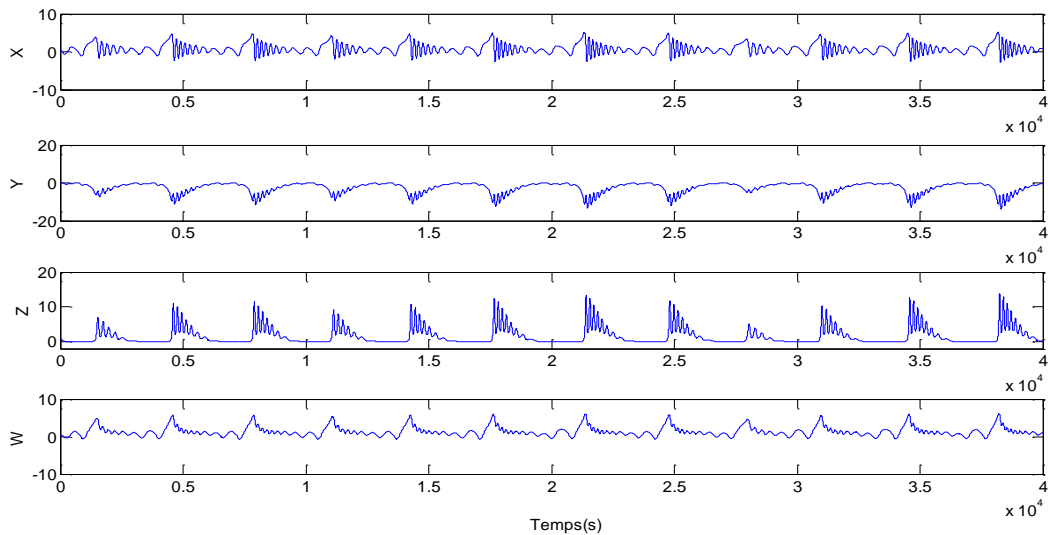
$$a_1 = 0.09, a_2 = 0.15, b_1 = 0.06, b_2 = 0.083, b_3 = 0.07, c_1 = 0.2, c_2 = 0.5, c_3 = 0.4,$$

$$M = 1.8, N = 1.0$$

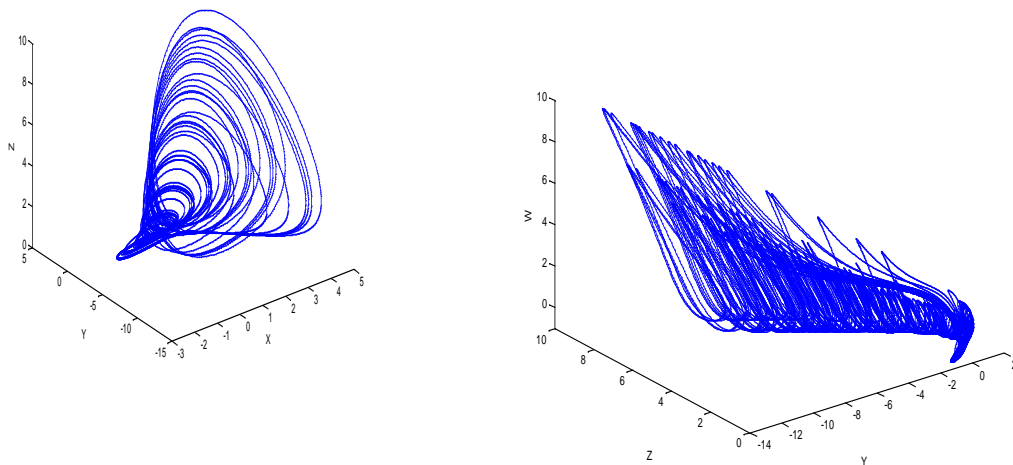
Les paramètres sont sélectionnés avec un  $d_1 = 0.1, d_2 = 0.06$  et  $d_3 = 0.08$  pour assurer un comportement hyper chaotique. Les réponses temporelles et les portraits de phase de système de quatre dimensions (4-D) et sont illustrés sur les figures 5.11 et 5.12.

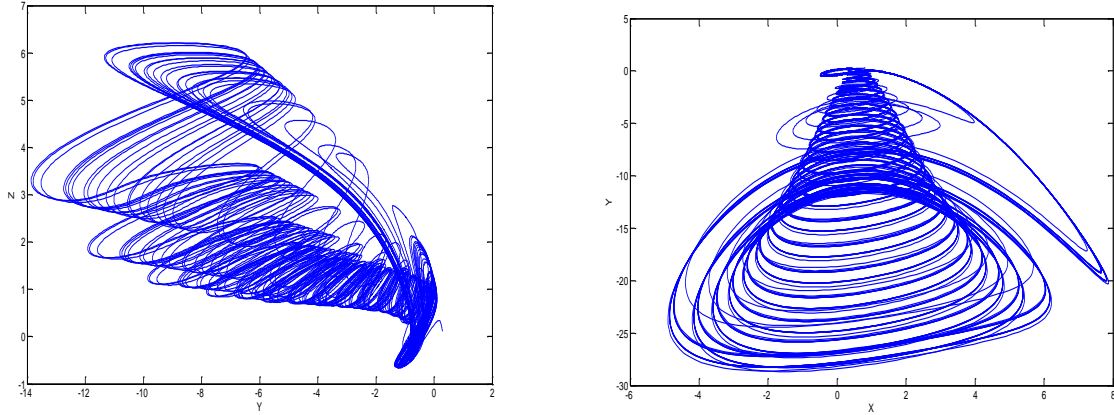
Le contrôle prédictif est appliqué au système (5.25) avec le choix des conditions initiales  $(x_0, y_0, z_0, w_0) = (-5, -9.14, -6.9, -5.54)$  et le vecteur du gain  $K = (-0.98, 0, 0, 0)$ . L'algorithme de Runge-Kutta est appliqué pour la simulation de ce système. La figure 5.13 présente les résultats de simulation de contrôle prédictif.

Les résultats de simulation montrent que le système se stabilise avec un gain très petit.

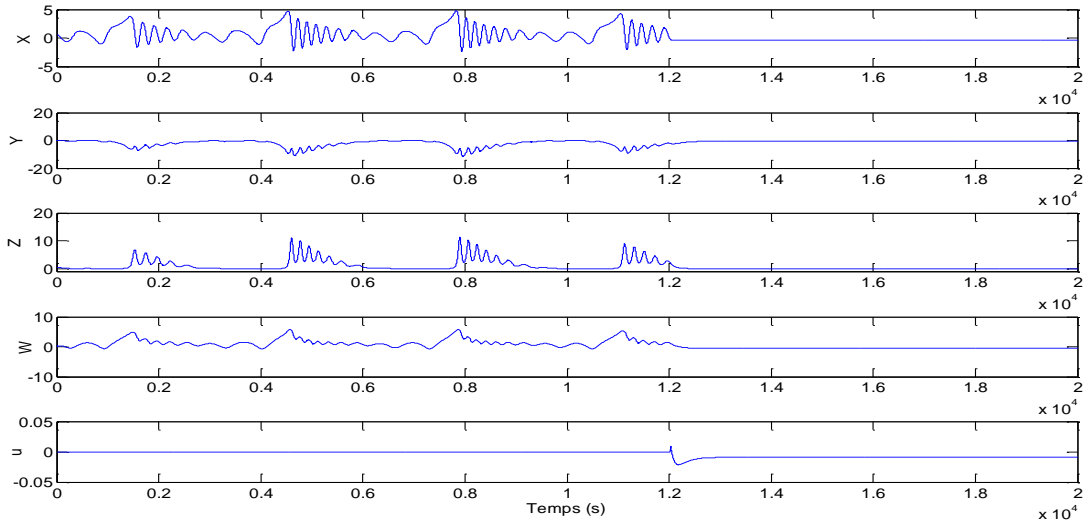


**Figure.5.11 : Les réponses temporelles du système hyper-chaotique.**





**Figure.5.12 : Attracteurs chaotiques.**



**Figure.5.13 : Contrôle prédictif de système d'énergie hyper-chaotique.**

### 5.7 Synchronisation des systèmes chaotiques

La synchronisation des systèmes chaotiques est devenue un nouveau domaine de recherche très important ces dernières années [118]. Ainsi qu'aux applications potentielles qu'on pouvait en faire, particulièrement dans le domaine de l'électronique, de la biologie et des télécommunications.

Dans la théorie de la synchronisation, nous définissons un système maître, qui est le système dominant et un ensemble délimités de système esclave (réponse). Le problème de synchronisation consiste à créer soit des interconnexions physiques, soit des boucles de rétroaction de contrôle, qui force les sorties des systèmes esclaves à se conformer à celles du maître. Lorsqu'on sait qu'un système chaotique est un système déterministe, extrêmement sensible aux conditions initiales, on peut donc penser que deux systèmes chaotiques sont incontrôlables et ne peuvent se synchroniser

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

que si les conditions initiales sont exactement les mêmes. Depuis que l'idée de la synchronisation a été introduit par les travaux de Pecora et Carroll en 1990 [119] d'une part et de Ott, Grebogi et Yorke [120] d'autre part, beaucoup de travaux ont été publiés dans ce contexte. Diverse stratégies de synchronisation du chaos sont proposées dans la littérature. Parmi ces méthodes nous pouvons citer en particulier : le contrôle impulsif, le contrôle adaptatif, le contrôle par le mode glissant, le contrôle actif, le contrôle par la technique de backstepping et plus récemment le contrôle prédictif.

Dans ce chapitre, nous montrons la synchronisation d'un système chaotique et un autre hyperchaotique par la commande prédictive. La synchronisation basée sur le contrôle adaptatif de ce système a été présenté dans [117] ainsi que par le contrôle linéaire dans [121, 122].

Dans ce qui suit, nous présentons la synchronisation de deux systèmes chaotiques par l'application du contrôle prédictif proposé dans [123].

### 5.7.1 Système d'énergie chaotique

Le système de ressources énergétiques de trois dimensions (3-D) est exprimé par l'ensemble d'équations différentielles ordinaires suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = a_1 x \left(1 - \frac{x}{M}\right) - a_2 (y + z) \\ \dot{y} = -b_1 y - b_2 z + b_3 x [N - (x - z)] \\ \dot{z} = c_1 z (c_2 x - c_3) \end{cases} \quad (5.26)$$

Les paramètres  $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, MetN$  sont choisis de telle sorte que le système (5.26) présente un comportement chaotique.

Considérons les deux systèmes identiques; où le système maitre et le système esclave est noté par l'indice 1 et l'indice 2 respectivement.

#### a. Le système maitre

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_1 \left(1 - \frac{x_1}{M}\right) - a_2 (y_1 + z_1) \\ \dot{y}_1 = -b_1 y_1 - b_2 z_1 + b_3 x_1 [N - (x_1 - z_1)] \\ \dot{z}_1 = c_1 z_1 (c_2 x_1 - c_3) \end{cases} \quad (5.27)$$

#### b. Le système esclave

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = a_1 x_2 \left(1 - \frac{x_2}{M}\right) - a_2 (y_2 + z_2) + u_1 \\ \dot{y}_2 = -b_1 y_2 - b_2 z_2 + b_3 x_2 [N - (x_2 - z_2)] + u_2 \\ \dot{z}_2 = c_1 z_2 (c_2 x_2 - c_3) + u_3 \end{cases} \quad (5.28)$$



## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

L'objectif de la méthode est de concevoir des fonctions du contrôleur  $u_1, u_2$  et  $u_3$  de telle sorte que le système (5.27) se synchronise avec le système esclave (5.28).

Définir les états du système d'erreur :  $e_1 = x_2 - x_1, e_2 = y_2 - y_1$  et  $e_3 = z_2 - z_1$ . Ensuite, la dynamique des états du système d'erreurs est exprimée comme suit :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = a_1 e_1 - a_2(e_2 + e_3) - \frac{a_1}{M}(x_2^2 - x_1^2) + u_1 \\ \dot{e}_2 = b_3 N e_1 - b_1 e_2 - b_2 e_3 - b_3(x_2^2 - x_1^2) + b_3(x_2 z_2 - x_1 z_1) + u_2 \\ \dot{e}_3 = -c_1 c_3 e_3 + c_1 c_2(x_2 z_2 - x_1 z_1) + u_3 \end{cases} \quad (5.29)$$

La synchronisation des deux systèmes d'énergies est atteindre la stabilité asymptotique de systèmes (5.29)

Utilisant le contrôle prédictif pour les systèmes chaotiques continus [114] ; Nous choisissons les fonctions de contrôle  $u_1, u_2$  et  $u_3$  comme suit :

$$\begin{cases} u_1 = 0 \\ u_2 = K[b_3 N e_1 - b_1 e_2 - b_2 e_3 - b_3(x_2^2 - x_1^2) + b_3(x_2 z_2 - x_1 z_1) - e_1] \\ u_3 = 0 \end{cases} \quad (5.30)$$

L'erreur de système (5.29) est devenue :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = a_1 e_1 - a_2(e_2 + e_3) - \frac{a_1}{M}(x_2^2 - x_1^2) \\ \dot{e}_2 = -b_1 e_2 - b_2 e_3 + b_3 N e_1 - b_3(x_2^2 - x_1^2) + b_3(x_2 z_2 - x_1 z_1) + \\ K[b_3 N e_1 - b_1 e_2 - b_2 e_3 - b_3(x_2^2 - x_1^2) + b_3(x_2 z_2 - x_1 z_1) - e_2] \\ \dot{e}_3 = -c_1 c_3 e_3 + c_1 c_2(x_2 z_2 - x_1 z_1) \end{cases} \quad (5.31)$$

Selon [124], l'erreur de système (5.31) est asymptotiquement stable sur le point d'équilibre si le gain  $K$  est satisfait :

$$|-b_1 + K(-b_1 - 1)| < 1 \quad (5.32)$$

Et le voisinage du point d'équilibre est donné par la formule suivante :

$$r(t) = |e_2(t) - e_2(t - \Delta t)| < \varepsilon \quad (5.33)$$

Pour les petites constantes positifs  $\Delta t$  et  $\varepsilon$ .

L'algorithme de Runge-Kutta de quatrième ordre est utilisé pour résoudre les équations différentielles des systèmes (5.29) et (5.31) avec un pas  $\Delta t = 0.01$ .

On applique la synchronisation prédictive au système d'erreur (5.31), en choisissant

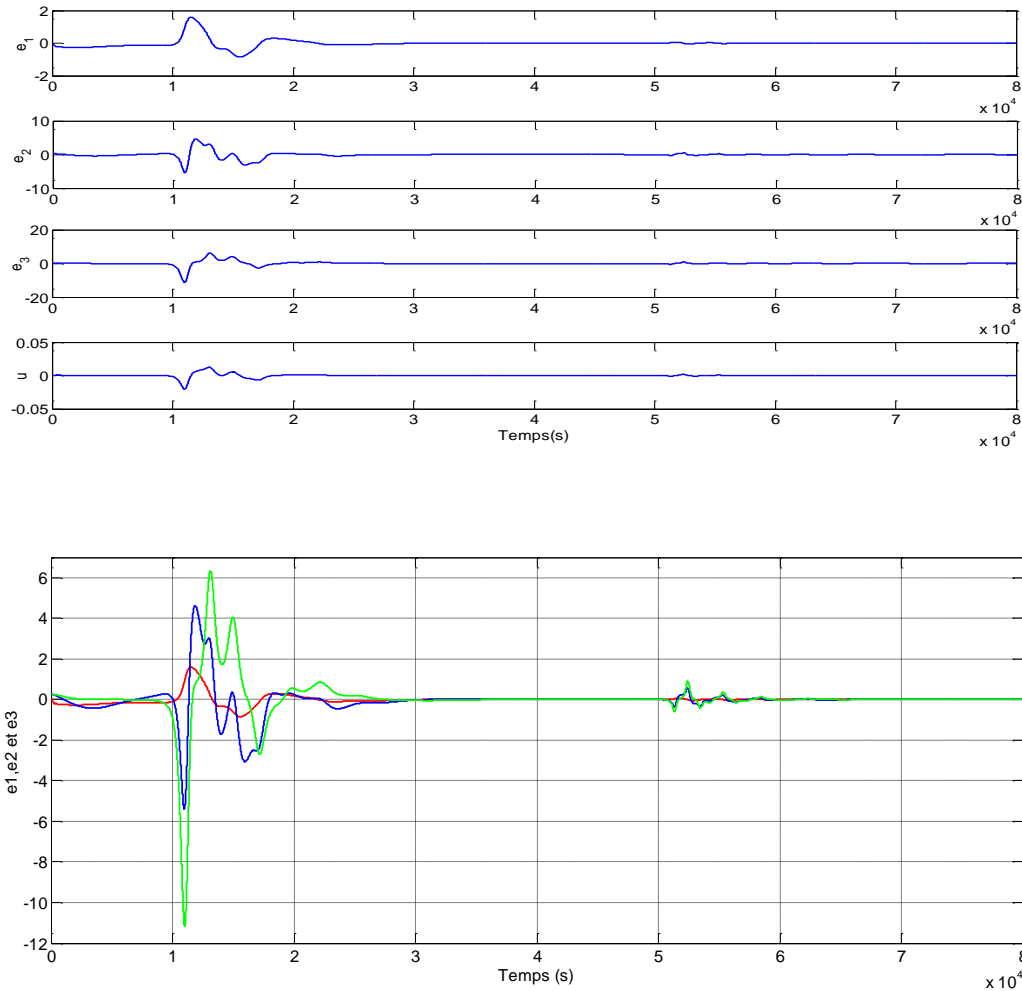
$$K = -0.98, \Delta t = 0.01 \text{ et } \varepsilon = 0.01.$$

Les valeurs initiales pour le système maître sont :  $(x_1(0), y_1(0), z_1(0))^T = (1.8, -2.8, 2.3)^T$  et les valeurs initiales de système esclave sont  $(x_2(0), y_2(0), z_2(0))^T = (1.51, -3.16, -0.4)^T$ .

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

Les résultats de simulation sont illustrés dans la figure 5.14.

A partir de la figure 5.14, il est clair que le système d'erreur converge vers le point d'équilibre d'origine car le temps  $t$  tend vers l'infini avec une force appliquée très faible et par conséquent, le système maître et le système esclave sont parfaitement synchronisés.



**Figure.5.14 : erreur de synchronisation de système d'énergie chaotique.**

### 5.7.2 Synchronisation prédictive d'un système de ressource énergétique hyper chaotique

Pour ce système de 4-D, le système maître et le système esclave sont définis comme :

## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_1 \left(1 - \frac{x_1}{M}\right) - a_2 (y_1 + z_1) - d_3 w_1 \\ \dot{y}_1 = -b_1 y_1 - b_2 z_1 + b_3 x_1 [N - (x_1 - z_1)] \\ \dot{z}_1 = c_1 z_1 (c_2 x_1 - c_3) \\ \dot{w}_1 = d_1 x_1 - d_2 w_1 \end{cases} \quad (5.34)$$

Et

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = a_1 x_2 \left(1 - \frac{x_2}{M}\right) - a_2 (y_2 + z_2) - d_3 w_2 + u_1 \\ \dot{y}_2 = -b_1 y_2 - b_2 z_2 + b_3 x_2 [N - (x_2 - z_2)] + u_2 \\ \dot{z}_2 = c_1 z_2 (c_2 x_2 - c_3) + u_3 \\ \dot{w}_2 = d_1 x_2 - d_2 w_2 + u_4 \end{cases} \quad (5.35)$$

Notre objectif est de synchroniser les systèmes maître et esclave en appliquant un contrôle basé sur la prédiction aux fonctions du contrôleur  $u_1, u_2, u_3$  et  $u_4$ .

Définissons l'ensemble des erreurs :  $e_1 = x_2 - x_1, e_2 = y_2 - y_1, e_3 = z_2 - z_1$  et  $e_4 = w_2 - w_1$ .

Utilisant cette notation, nous obtenons la dynamique du système d'erreur de la façon suivante :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = a_1 e_1 - a_2 (e_2 + e_3) - d_3 e_4 - \frac{a_1}{M} (x_2^2 - x_1^2) + u_1 \\ \dot{e}_2 = b_3 N e_1 - b_1 e_2 - b_2 e_3 - b_3 (x_2^2 - x_1^2) + b_3 (x_2 z_2 - x_1 z_1) + u_2 \\ \dot{e}_3 = -c_1 c_3 e_3 + c_1 c_2 (x_2 z_2 - x_1 z_1) + u_3 \\ \dot{e}_4 = d_1 e_1 - d_2 e_4 + u_4 \end{cases} \quad (5.36)$$

Les contrôleurs prédictifs  $u_1, u_2, u_3$  et  $u_4$  étant donnés par :

$$\begin{cases} u_1 = 0 \\ u_2 = K [b_3 N e_1 - b_1 e_2 - b_2 e_3 - b_3 (x_2^2 - x_1^2) + b_3 (x_2 z_2 - x_1 z_1) - e_1] \\ u_3 = 0 \\ u_4 = 0 \end{cases} \quad (5.37)$$

Et l'erreur de système (5.36) devient :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = a_1 e_1 - a_2 (e_2 + e_3) - d_3 e_4 - \frac{a_1}{M} (x_2^2 - x_1^2) \\ \dot{e}_2 = b_3 N e_1 - b_1 e_2 - b_2 e_3 - b_3 (x_2^2 - x_1^2) + b_3 (x_2 z_2 - x_1 z_1) + \\ \quad K [b_3 N e_1 - b_1 e_2 - b_2 e_3 - b_3 (x_2^2 - x_1^2) + b_3 (x_2 z_2 - x_1 z_1) - e_1] \\ \dot{e}_3 = -c_1 c_3 e_3 + c_1 c_2 (x_2 z_2 - x_1 z_1) \\ \dot{e}_4 = d_1 e_1 - d_2 e_4 \end{cases} \quad (5.38)$$

Par conséquent,  $K$  doit satisfaire la même condition que celle en (5.32). L'algorithme de Runge-Kutta de quatrième ordre est utilisé pour résoudre les systèmes (5.36) et (5.38) avec un pas égal  $\Delta t = 0.01$ .

Les paramètres sont sélectionnés comme pour le système (5.25) avec un  $d_1 = 0.1, d_2 = 0.06$  et  $d_3 = 0.08$  pour assurer un comportement hyper chaotique.

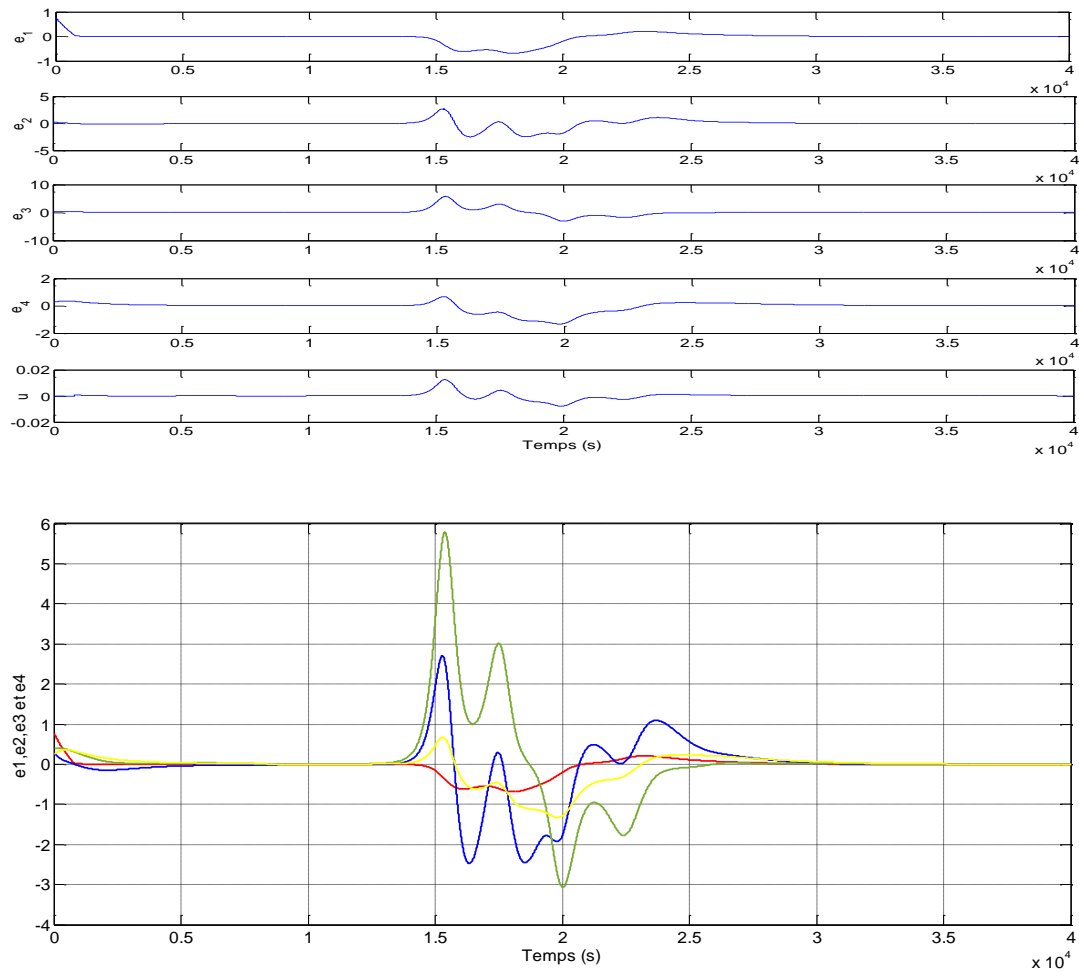
## Chapitre V. Contrôle et Synchronisation des systèmes d'énergie chaotique

La synchronisation prédictive est appliquée au système d'erreurs (5.36) par un choix des mêmes valeurs de  $K, \Delta t$  et  $\varepsilon$ .

Les valeurs initiales de système maitre et esclave sont :

$(x_1(0), y_1(0), z_1(0), w_1(0))^T = (-5, -9.14, -6.9, -5.54)^T$  et  $(x_2(0), y_2(0), z_2(0), w_2(0))^T = (5.6, -2.96, 1, 2.86)^T$  respectivement.

Les résultats de simulations sont présentés sur la figure 5.15 ; qui démontre clairement l'efficacité du contrôleur proposé pour la stabilité asymptotique de système d'erreur sur le point d'équilibre d'origine en utilisant seulement une petite force appliquée, et par conséquent le système maitre et le système esclave sont parfaitement synchronisés.



**Figure.5.15 : erreur de synchronisation de système d'énergie hyper chaotique.**

## **5.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a examiné le contrôle et la synchronisation des systèmes de ressources énergétiques chaotiques et hyper chaotique à l'aide d'une approche de contrôle simple et efficace basée sur la prédiction. A partir des résultats obtenus, les deux systèmes ont été bien contrôlés en utilisant la même loi de contrôle puisqu'ils ont une structure dynamique complexe identique. Ceci peut être considéré comme une réelle motivation pour appliquer l'approche de contrôle proposée pour des applications pratiques de synchronisations.

## Conclusion générale

De nos jours, l'utilisation des sources des énergies renouvelables dans le réseau actuel augmente très rapidement. Dans ce contexte, le concept de MR était proposé comme une solution pour intégrer efficacement ces sources d'énergie renouvelables et réaliser une gestion intelligente d'énergie. Par conséquent, les convertisseurs électroniques de puissance sont considérés comme des technologies nécessaires pour tirer de nombreux avantages des systèmes de production décentralisés.

L'objectif de cette thèse est de faire le contrôle d'un micro-réseau de type DC qui est constitué de sources hybrides de production décentralisée intégrant le photovoltaïque, la pile à combustible et une batterie de stockage. Afin d'améliorer la performance du système PV, la méthode de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) était faite par l'algorithme (InCond). Le contrôle des convertisseurs DC/DC boost et le convertisseur bidirectionnel qui s'interface la pile à combustible et la batterie de stockage est réalisé à base de contrôle de la boucle de tension et la boucle du courant par le régulateur PI ; afin de maintenir la tension du bus de liaison DC constant.

Le contrôle de l'onduleur de tension (VSI) qui interface ce MR est fait en deux modes de fonctionnement:

- Le contrôle du courant de sortie de VSI en mode connecté au réseau principale était fait par la commande classique PI-MLI et la commande prédictive (FCS-MPC).
- Dans le deuxième cas le VSI est connecté au DC MR en mode îloté avec un filtre LC et une charge linéaire, dans ce cas le contrôle de la tension de sortie de VSI est nécessaire. La commande prédictive était appliquée pour contrôler la tension de VSI et la mettre sous la forme sinusoïdale avec moins de distorsion harmonique (THD).

Il a également été vérifié que la méthode FCS-MPC offre plusieurs avantages par rapport aux régulateurs classiques PI :

- La commande multi-variable est facilement possible en jouant sur la fonction coût.
- Les contraintes peuvent être prises en compte sans aucun problème et la non-linéarité peut également être incluse.

## Conclusion générale

- La commande FCS-MPC ne produit normalement pas de dépassement, ce qui habituel pour les contrôleurs conventionnels.

La non-linéarité et la complexité des systèmes d'alimentation électrique rendent le système très sensible et vulnérable ce qui présente un comportement chaotique, qui nécessite un tel contrôle pour le stabiliser. Dans cette thèse on a étudié un système d'alimentation d'énergie pour différentes régions, qui a un comportement chaotique et un autre système avec un comportement hyper-chaotique. Le contrôle et la synchronisation de ces deux systèmes était fait à base de la commande prédictive, qui donne des résultats satisfaisants. L'efficacité de cette technique est d'appliquer la loi de contrôle sur une équation d'état de ce système et la stabilisation et la synchronisation des autres équations d'états se fait automatiquement.

Comme perspectives à cette étude, on peut soulever les points suivants :

- Associer la commande MPC avec une technique de contrôle intelligente tel que la logique floue et les algorithmes génétiques pour l'optimisation du réseau MRs.
- Ajouter d'autres types des sources d'énergies dans le réseau.
- Etudier le cas du comportement chaotique dans les convertisseurs DC-DC.

## Références bibliographiques

- [1] "U. S. Department of Homeland Security, Science and Technology Directorate", National Power Grid Simulation Capability: Needs and Issues. *Argonne, Illinois*, Dec. 2008.
- [2] T. T. Dan , & A. Smith. Merrill, "The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative", *Published by Elsevier on The Electricity Journal*, vol. 25, no. 8, Oct. 2012.
- [3] A. Keyhani, M. N. Marwali, & D. Min, "Integration of Green and Renewable Energy in Electric Power System", *John Wiley*, 2010.
- [4] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, & M. A. S. Masoum, "Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile", *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 2, no. 3, Sept. 2011.
- [5] "Ontario Smart Grid Progress Assessment: A Vignette", *Ontario Smart Grid Forum*, pp. 110, April. 2013.
- [6] R. R. Mohassel, A. Fung, F. Mohammadi, & K. Raahemifar, "A survey on advanced metering infrastructure", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 473-484, 2014.
- [7] U. DOE, "Communications requirements of Smart Grid technologies", *US Department of Energy, Tech. Rep*, pp. 1-69, Oct. 2010.
- [8] I. L. Pearson, "Smart grid cyber security in Europe", *Energy policy*, vol. 39, no. 9, pp. 5211-5218, Sept. 2011.
- [9] O. S. C. team, "Communications requirements of smart grid technologies", *Department of Energy*, Oct. 2010.
- [10] Z. H. Wang, F. Shen, T. Z. Wu, "FACTS applications in china and its developing trends, Automation of Electric Power Systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.24, pp. 1-5, 2000.
- [11] D. Fallows, S. Nuzzo, A. Costabeber, M. Galea, " Harmonic Reduction Methods for Electrical Generation: A Review", *IET Generation Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 13, pp. 3107-3113, April. 2018.
- [12] C. H. Huang, C. H. Lin, & C. L. Kuo, "Chaos Synchronization-based Detector for Power-Quality Disturbances Classification in a Power System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 944-953, April. 2011.
- [13] Y. F. Huang, S. Werner, J. H. Kashyap, N. V. Gupta, "State Estimation in Electric Power Grids: Meeting New Challenges Presented by the Requirements of the Future Grid", *IEEE on Signal Processing Magazine*, vol. 29, no. 5, pp. 33-43, Sept. 2012.



## Références bibliographiques

- [14] B. Omoigã, M. Chindris, A. Sumper, A. Sudria-Andreu, R. Villafafila-Robles, "Pareto Optimal Reconfiguration of Power Distribution Systems Using a Genetic Algorithm Based on NSGA-II", *Energies*, vol. 6, pp. 1439-1455, March. 2013.
- [15] L. T. Berger, & I. Krzysztof, "Smart Grid- Applications, Communications and Security", *John Wiley and Sons*, ISBN: 978-1-118-00439, 5 April .2012.
- [16] E. Kuznetsova, K. Culver, & E. Zio, "Complexity and Vulnerability of Smart grids Systems". *Troyes, France*, pp. 2474-2482, Nov. 2012.
- [17] L. Wang, D. Zhang, Y. Wang, B. Wu, & H. Athab, "Power and Voltage Balance Control of a Novel Three-Phase Solid-State Transformer Using Multilevel Cascaded H-Bridge Inverters for Microgrid Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 4, pp. 3289–3301, April. 2016.
- [18] J. M. Guerrero, "What are microgrid", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 5, Dec.2013.
- [19] T. S. Basso, & R. DeBlasio, "IEEE 1547 series of standards: interconnection issues", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.19, no. 5, pp.1159-1162, Sept. 2004.
- [20] S. N.Bhaskara, "Control and operation of multiple distributed generators in a microgrid", *Master of Science in electrical engineering Faculty of the Graduate School, Missouri university of Science and Technology*, 2012.
- [21] P. Mitra, G. T. Heydt, & V. Vittal, "The impact of distributor photovoltaic generation on residential distributed systems", in *Proc IEEE, Conf. on North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-6, Oct. 2012.
- [22] M. Saleh, Y. Esa, & A. Mohamed, "Communication Based Control for DC Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 279-1361, Jan. 2018.
- [23] M. Saleh, Y. Esa, & A. Mohamed, "Hardware based testing of communication based control for DC microgrid", in *Proc. IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, CA, USA*, pp.5-8, Dec.2017
- [24] N. Cai, J. Mitra, "A decentralized control architecture for a microgrid with power electronic interfaces", in *Proc. IEEE Conference*, Published by North American Power Symposium, Sep. 2010.

## Références bibliographiques

- [25] M. Angjelichinoski, A. Scaglione, P. Popovski, & C. Stefanovic, "Decentralized DC Microgrid Monitoring and Optimization via Primary Control Perturbations", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 12, pp.3280–3295, 2018.
- [26] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, & J. C. Vasquez, "Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids- A Novel Approach", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 1018–1031, 2014.
- [27] S. Moayedi, & A. Davoudi, "Distributed Tertiary Control of DC Microgrid Clusters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 2, pp. 1717–1733, Feb. 2016.
- [28] A. Bidram , & A. Davoudi , "Hierarchical Structure of Microgrids Control System", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1963-1976, Dec. 2012.
- [29] M. Ilić, & J. Zaborszky, "Dynamics and Control of Large Electric Power Systems", *Wiley*, 2000.
- [30] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, & J. W. Jung, "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review", *Journal on Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 387–405, 2013.
- [31] E. Unamuno, & J. A. Barrena, "Hybrid ac/dc microgrids-PartI: Review and classification of topologies", *ELSEVIER Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1251–1259, 2015.
- [32] H. J. Laaksonen, "Protection Principles for Future Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 2910–2918, 2010.
- [33] M. Paget, T. Seacrest, S. Widergren, P. Balducci, A. Orrell, & C. Bloyd, "Using Smart Grids to Enhance Use of Energy-Efficiency and Renewable-Energy Technologies", Report prepared for the APEC Energy Working Group by Pacific Northwest National Laboratory, USA. May. 2011.
- [34] W. Gu, Z. Wu, & X. Yuan, "Microgrid economic optimal operation of the combined heat and power system with renewable energy", in *Proc. IEEE. Int. Conf. Power and Energy Society General Meeting*, pp.1-6, 30 Sept. 2010.

## Références bibliographiques

- [35] A. L. Fahrenbruch and R. H. Bube, "Fundamentals of Solar Cells, photovoltaic solar energy conversion", New York: Academic Press, 1983, ISBN. 0122476808.
- [36] T. Dahl. "Photovoltaic Power Systems", <http://polarpower.org>.
- [37] A. Thakur. Devashish, S. Panigrahi, & R.R. Behera, "A review on wind energy conversion system and enabling technology", in *Proc. IEEE. International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, pp. 527-532, Dec. 2016.
- [38] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, & S. Kouro, "Power Conversion and Control of Wind Energy Systems", *Wiley-IEEE Press*, 2011.
- [39] J. Nikolettatos, & S. Tselepis, "Renewable Energy Integration in Power Grids: Technology Brief ", EA-ETSAP and IRENA, April. 2015.
- [40] B. Gou, W. Ki Na, & B. Diong, "Fuel cells: modeling, control, and applications, Power electronics and applications", *International Standard Book Number: 978-1-4200-7161-0*, Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
- [41] P. Thounthong, S. Rael, & B. Davat, "Control strategy of fuel cell and super capacitors association for a distributed generation system", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 3225-3233, Dec. 2007.
- [42] N. D.Benavides,& P. L.Chapman, "Mass-optimal design methodology for dc-dc converters in low-power portable fuel cell applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.23, no.3, pp. 1545-1555, May. 2008.
- [43] S.Naylor, V.Pickert, & D.Atkinson, "Fuel cell drive train topologies-computer analysis of potential systems", in *Proc. IEEE. The 3rd IET International Conference in Power Electronics, Machines and Drives*, pp. 398-403, 4-6 April. 2006.
- [44] J. H. Wee, "Application of proton exchange membrane fuel cell systems", *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 11, no. 8, pp. 1720-1738, 2007.
- [45] P. Pathomchaiwat, & B. Neammanee, "Control of power management in the renewable energy system by using Flywheel Energy Storage", in *proc. IEEE. 14th International Conference on Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand*, pp. 513-516, Jun. 2017.
- [46] J. R. Miller, & P. Simon, "Fundamentals of electrochemical capacitor design and operation," in *Electrochemical Society Interface*, vol.17, no. 1, pp. 31-32, March. 2008.

## Références bibliographiques

- [47] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, & Y. Ding , "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, vol.19, no.3, pp.291-312, March. 2009.
- [48] R. Carnegie, D. Gptham, D. Nderitu, & P. V. Preckel, "Utility Scale Energy Storage Systems Benefits, Application and Technologies", *State Utility Forecasting Group, submitted in June. 2013.*
- [49] Q. C.Zhong, & T. Hornik, "Control of Power Inverters In Renewable Energy And Smart Grid Integration", *John Wiley & Sons, Ltd, 2013.*
- [50] K. Tytelmaier, O. Husev, O. Veligorskyi, & R. Yershov, "A Review of Non-isolated Bidirectional DC-DC Converters for Energy Storage Systems", in Proc. IEEE. Conf. II International Young Scientists Forum On Applied Physics and Engineering (YSF), Oct. 2016.
- [51] A. Merabet, K. T. Ahmed, H. Ibrahim, R. Beguenane, & A. M. Y. M. Ghias, "Energy Management and Control System for Laboratory Scale Microgrid Based Wind-PV-Battery", *IEEE Transaction on Sustain. Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 145– 154, Jan. 2017.
- [52] M. C. Mira, Z. Zhang, A. Knott, & M. A. E. Andersen, "Analysis, Design, Modeling, and Control of an for Hybrid Renewable Energy Systems", *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1138–1155, Feb. 2017.
- [53] J. Paska, P. Biczal, and M. Kłos, "Hybrid power systems -An effective way of utilizing primary energy sources", *Journal on Renewable Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 2414– 2421, March. 2009.
- [54] J. Philip, C. Jain, K. Kant, B. Singh, S. Mishra, A. Chandra, & K. Al-Haddad, "Control and Implementation of a Standalone Solar Photovoltaic Hybrid System", *IEEE Transaction Industry Applications*, vol. 52, no. 4, pp. 3472–479, April. 2016.
- [55] L. Wang, Q. S. Vo, & A. V. Prokhorov, "Dynamic Stability Analysis of a Hybrid Wave and Photovoltaic Power Generation System Integrated into a Distribution Power Grid", *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 404–413, Jan. 2017.
- [56] O. M. Toledo, D. Oliveira Filho, & A. S. A. C. Diniz, "Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 14, no. 1, pp. 506–511, Jan. 2010.
- [57] R. A. Walling, R. Saint, R. C. Dugan, J. Burke, & L. A.Kojovic , "Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems", *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1636–1644, July. 2008.

## Références bibliographiques

- [58] J. P. Ram, N. Rajasekar, & M. Miyatake, "Design and overview of maximum power point tracking techniques in wind and solar photovoltaic systems: A review", *Journal on Renewable and Sustainable Energy*, vol. 73, pp. 1138–1159, June. 2017.
- [59] A. G. Madureira, & J. A. P. Lopes, "Coordinated voltage support in distribution networks with distributed generation and microgrids", *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 4, pp.439–454, Dec. 2009.
- [60] B. Kroposki, C. Pink, R. Deblasio, H. Thomas, M. Simoes,& P. K, " Benefits of Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 901–908, Sept. 2010.
- [61] S. Chakraborty, B. Kramer, & B. Kroposki, "A review of power electronics interfaces for distributed energy systems towards achieving low-cost modular design", *Journal on Renewable and Sustainable Energy*, vol. 13, no. 9, pp. 2323–2335, Dec. 2009.
- [62] M. G.Villalva, & J. R.Gazolietal, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic array", *Power Electronics, IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May. 2009.
- [63] M. Veerachary, "Power tracking for nonlinear PV sources with coupled inductor SEPIC converter", *IEEE Transaction in Aerospace & Electronics Systems*, vol. 41, no. 3, pp. 1019-1029, July. 2005.
- [64] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, & A. Lazaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems", *Journal in Solar energy materials and solar cells*, vol. 90, pp. 1555-1578, July. 2006.
- [65] M. A. Masoum, H. Dehbonei, & E. F. Fuchs, "Theoretical and experimental analyses of photovoltaic Systems with voltage and current-based maximum power-point tracking", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 4, pp.514-522, Dec. 2002.
- [66] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, & M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963-973, July. 2005.
- [67] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, & Y. Kang, "A variable step size INC MPPT method for PV systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, pp. 2622-2628, July. 2008.
- [68] A. E. S. Nafeh, F. H. Fahmy, & E. M. Abou El-Zahab, "Maximum-power operation of a stand-alone PV system using fuzzy logic control", *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 15, no. 4, pp. 385-398, July. 2002.

## Références bibliographiques

- [69] H. Valderrama, Blavi, J. M. Bosque, F. Guinjoan, L. Marroyo, & L. Martinez-Salamero, "Power adaptor device for domestic DC microgrids based on commercial MPPT inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 1191-1203, March. 2013.
- [70] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, & F. Blaabjerg, "Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions", *Aalborg, Denmark: Aalborg Univ./Inst. Energy Technology*, 2006.
- [71] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, & N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 46-54, Jan. 2001.
- [72] R. J. Wai, W. H. Wang, & C. Y. Lin, "High-performance stand-alone photovoltaic generation system", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 240–250, Jan. 2008.
- [73] X. Yu, M. R. Starke, L. M. Tolbert, & B. Ozpineci, "Fuel cell power conditioning for electric power applications: a summary," *Electric Power Applications, IET*, vol. 1, no. 5, pp. 643-656, Sept. 2007.
- [74] S. G. Tesfahunegn, P. J. S. Vie, T. M. Undeland, & Ø. Ulleberg, "A combined steady state and dynamic model of a proton exchange membrane fuel cell for use in DG system simulation", *in Proc. IEEE. International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -, pp. 2457-2464, Japan, 21-24, Jun. 2010.
- [75] M. Azri, A. N. Abdul Mubin, Z. Ibrahim, N. AbdRahim, & S. R. Sheikh Raihan, "Mathematical modeling for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 86, no. 3, 30th April. 2016.
- [76] S. Jain, J. Jiang, X. Huang, & S. Stevandić, "Modeling of Fuel-Cell Based Power Supply System for grid Interface", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 4, AUG. 2012.
- [77] S. Gupta, & S. S. Lini Mathew, "Modeling of the 2.4KW Residential Fuel Cell Based Power Generation System", *IJART CSSE*, vol. 3, no. 9, Sept. 2013.
- [78] J. Kim, & B. H. Cho, "State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per Unit System", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 9, pp. 4249–4260, Nov. 2011.

## Références bibliographiques

- [79] S. Sepasi, R. Ghorbani, & B. Y. Liaw, "A novel on-board state-of-charge estimation method for aged Li-ion batteries based on model adaptive extended Kalman filter", *Journal of Power Sources*, vol. 245, no. 1, pp. 337-344, Jan. 2014.
- [80] Soon, C. Moo, Y. Chen, & Y. Hsieh, "Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries", *Applications on Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511, Sept. 2009.
- [81] R. E. Kalman, "Contributions to the theory of optimal control", *Bulletin da la Societe Mathematique de Mexicana*, vol. 5, pp. 102–119, 1960.
- [82] J. Holtz, & S. Stadtfeld, "A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source", *In Proc. IEEE. International Power Electronics Conference (IPEC)*, pp. 1665–1675, Sept. 1983.
- [83] T. GEYER, "Model Predictive Control of High Power converter and Industrial Drives ", *John Wiley & Sons, Ltd, 2017*.
- [84] Y. Shen, "Microgrid Control strategy study and controller design based on model predictive control ", *thesis Master of Science, University of Denver, March. 2017*.
- [85] G. Papafotiou, T. Geyer, & M. Morari, "A hybrid model predictive control approach to the direct torque control problem of induction motors" *Int. Journal. of Robust Nonlinear Control*, vol. 17, no. 17, pp. 1572–1589, Nov. 2007.
- [86] J. B. Rawlings, & D. Q. Mayne, "Model predictive control: Theory and design", *Madison, WI, USA: Nob Hill Publ, 2009*.
- [87] M. B. Shadmand, M. Mosa, R. S. Balog, & H. Abu-Rub, "An Improved MPPT Technique of High Gain DC-DC Converter by Model Predictive Control for Photovoltaic Applications", *In Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition (APEC)*, pp. 1048-2334, March. 2014.
- [88] P. Cortes, F. Quiroz, & J. Rodriguez, "Predictive Control of a grid-Connected Cascaded H-bridge Multilevel Converter ", *in Proc. IEEE. European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1-7, Sept. 2011.
- [89] P. Cortés, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo, & J. Rodríguez, "Predictive Control in Power Electronics and Drives", *IEEE Transactions. Ind. Electron*, vol. 55, no.12, pp. 4312–4324, Dec. 2008.

## Références bibliographiques

- [90] S. Vazquez, J. I. Leon, L. G. Franquelo, H. A. Young, A. Marquez, & P. Zanchetta, "Model Predictive Control -A review of its applications in power electronics", *IEEE Transactions Ind. Electron. Mag*, vol. 8, no. 1, pp. 16–31, March. 2014.
- [91] J. Rodríguez, & M. P. Kazmierkowski, "State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics", *IEEE Transactions Ind. Informat*, vol. 9, no. 2, pp. 1003–1016, May. 2013.
- [92] S. Mariéthoz, & M. Morari, "Explicit model-predictive control of a PWM inverter with an LCL filter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 2, pp. 389-399, Feb. 2009.
- [93] I. Benchabane, A. Boukabou, "A Control Strategy of DC Microgrid using FCS-MPC Controller ", *International Conference in Advanced Mechanics and Renewable Energies ICAMRE2018*, 28 & 29 Nov. 2018, Boumerdes – Algeria.
- [94] J. Vasquez, J. M. Guerrero, J. Miret, M. Castilla, & L. G. Vicuna, "Hierarchical control of intelligent microgrids", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, no. 4, pp. 23-29, Dec.2010.
- [95] J. Pecas, "Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, May. 2006.
- [96] J. Vasquez. Quintero, "Decentralized control techniques applied to electric power distributed generation in microgrids ", *PhD thesis , Universitat Politècnica de Catalunya, 2009*.
- [97] M. S. Hebatallah, H. Z. Hatem, & S. Ehab, "Protection Coordination for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities Using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcorrect Relays", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 1, Jan. 2018.
- [98] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, & P. Rodriguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electron*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012.
- [99] J. Rodriguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortes, & U. Ammann, "Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 495–503, Feb. 2007.
- [100] S. Bayhan, M. Trabelsi, H. Abu-Rub,& M. Malinowski, "Finite control set model predictive control for a quasi-z-source four-leg inverter under unbalanced load condition", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 2560–2569, April. 2017.



## Références bibliographiques

- [101] V. Yaramasu, M. Rivera, M. Narimani, B. Wu, & J. Rodriguez, "Model predictive approach for a simple and effective load voltage control of four-leg inverter with an output LC filter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5259–5270, Oct. 2014.
- [102] P. Karamanakos, T. Geyer, & R. Kennel, "A computationally efficient model predictive control strategy for linear systems with integer inputs", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 1463–1471, July. 2016.
- [103] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. deVicuna, & M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids A General Approach Toward Standardization", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011.
- [104] I. Benchabane, A. Boukabou, "Model Predictive Control approach for AC Voltage in Standalone microgrid", *Second International Conference on Electrical Engineering, ICEEB'18*, 2-3. Dec. 2018, Biskra -Algeria.
- [105] T. Dragičević, "Model Predictive Control of Power Converters for Robust and Fast Operation of AC Microgrids", *IEEE Transactions on Power electronics*, vol. 33, no. 7, pp. 0885-8993, July. 2017.
- [106] A. C. W. Baas, "Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments", *ELSEVIER Geomorphology*, vol. 48, no. 1-3, pp. 309–328, Nov. 2002.
- [107] J. S. Lee, & K. S. Chang, "Applications of chaos and fractals in process systems engineering", *Journal of Process Control*, vol. 6, no. 2-3, pp. 71–87, April. 1996.
- [108] Q. Sun, Y. Wang, J. Yang, Y. Qiu, & H. Zhang, "Chaotic Dynamics in Smart Grids and Suppression Scheme via Generalized Fuzzy Hyperbolic Model", *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, ID. 761271, pp. 7, Dec. 2014.
- [109] C. wang, C. Grebige, & M. Baptista, "Control and prediction for blackouts caused by frequency collapse in smart grids", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 26, no. 9, pp. 1054- 1500, Sept. 2016.
- [110] V. Ajjarapu, & B. Lee, "Bifurcation theory and its application to nonlinear dynamical phenomena in an electrical power system", *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 424–31, Feb. 1992.

## Références bibliographiques

- [111] T. Ushio, & S. Yamamoto, "Delayed feedback control with nonlinear estimation in chaotic discrete-time systems", *Elsevier Science, Physics Letters*, vol.247, pp. 112-118, July. 1998.
- [112] S. Yamamoto, T. Hino, & T. Ushio, "Dynamic delayed feedback controllers for chaotic discrete-time systems", *IEEE Transaction on Circuits and Systems*, vol. 48, no. 6, pp.785—789, Jun. 2001.
- [113] K. Pyragas, "Continues control of chaos by self-controlling feedback", *Physics Letters*, vol. 170, no. 6, pp. 421-428, Nov. 1992.
- [114] A. Boukabou, A. Chebbah, & N. Mansouri, "Predictive control of continuous chaotic systems", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 18, no. 2, pp. 587–592,2008.
- [115] M. Sun, L. Tian, & Y. Fu, "An energy resources demand-supply system and its dynamical analysis", *Chaos, Solitons and Fractal*, vol. 32, no. 1, pp.168–180, April. 2007.
- [116] M. Sun, Q. Jia, & L. Tian, "A new four-dimensional energy resources system and its linear feedback control", *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 39, no.1, pp.101–108, Jan. 2009.
- [117] M. Sun, L. Tian, Y. Fu, & W. Qian, "Dynamics and adaptive synchronization of the energy resource system", *Chaos, Soliton & Fract&l*, vol. 31, no. 4, pp. 879–888, Feb. 2007.
- [118] E. Mosekilde, Y. Maistrenko, & D. Postnov, "Chaotic Synchronization Applications to Living Systems", *World Scientific Series on Nonlinear Science Series A*, Singapore, Jan. 2002.
- [119] L. M.Pecora, & T. L. Carroll, "Synchronization in chaotic systems", *Phys. Rev. Lett.* 64, 821–824, Feb. 1990.
- [120] U. E. Vincent, "Chaos synchronization using active control and backstepping control: A comparative analysis", *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, vol. 13, no .2, pp. 253- 261, June. 2008.
- [121] Z. Wang, "Chaos synchronization of an energy resource system based on linear control", *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, vol. 11, no. 5, pp. 3336–3343, Oct. 2010.
- [122] Z. Wang, & X. Shi, "Synchronization of a four-dimensional energy resource system via linear control", *ELSEVIER, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* vol. 16, no. 1, pp. 463-471, Jan. 2011.
- [123] I. Benchabane, & A. Boukabou, "Predictive synchronization of chaotic and hyperchaotic energy resource systems", *ELSEVIER Optik, International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 127, no. 20, pp. 9532- 9537, Oct. 2016.

## Références bibliographiques

- [124] D. Sadaoui, A. Boukabou , N. Merabtine, & M. Benslama, "Predictive synchronization of chaotic satellites systems", *ELSEVIER Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 7, pp. 9041–9045, July. 2011.