

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Électrique



THÈSE DE DOCTORAT

En vue de l'obtention du diplôme de docteur en sciences en génie électrique

Gestion de l'énergie d'un système hybride autonome pour application « Smart Grid »

Réalisée par : **BENAOUADJ Mahdi**

Soutenue publiquement le : 04 / 06 / 2016

Devant le jury composé de :

BAHRI Mebarek	Professeur	Université de Biskra	Président
ABOUBOU Abdennacer	Professeur	Université de Biskra	Rapporteur
AYAD Mohamed-Yacine	Docteur	R&D dans l'industrie, France	Co-Rapporteur
BAHI Tahar	Professeur	Université d'Annaba	Examineur
BETKA Achour	Professeur	Université de Biskra	Examineur
LABAR Hocine	Professeur	Université d'Annaba	Examineur
DJERDIR Abdesslem	Professeur	UTBM, France	Invité

Année universitaire : 2015/2016

Remerciements

Remerciements

Avant tout, je remercie **ALLAH** le tout puissant, le miséricordieux, qui m'a donné la force et le courage pour achever cet humble travail.

Je remercie tout particulièrement **mes parents**, pour leur soutien inconditionnel au cours de ces longues années d'études.

Je tiens à remercier essentiellement mes encadreurs messieurs **ABOUBOU Abdennacer** et **AYAD Mohamed-Yacine** pour l'intérêt qu'ils ont apporté à ce travail de thèse.

Mes sincères remerciements s'adressent également, à messieurs les membres du jury, pour l'honneur qu'ils me feront en participant au jugement de ce travail.

Enfin, Je tiens à remercier vivement toute personne qui m'a aidée, de près ou de loin, à élaborer et à réaliser cette thèse.

Résumé - ملخص - Abstract

Gestion de l'énergie d'un système hybride autonome pour application « Smart Grid »

Le « Smart Grid » est une dénomination d'un réseau électrique intelligent et performant qui utilise les technologies de l'information dans le but d'optimiser la production, la distribution et la consommation de l'électricité, entraînant la résolution du problème de la gestion de l'énergie, ainsi que l'amélioration de l'efficacité du réseau.

Le problème de la gestion de l'énergie consiste à rechercher la répartition de puissance la plus convenable entre les différentes sources constituant un réseau électrique d'architecture hybride. Plusieurs critères d'évaluation interviennent pour le choix de cette répartition, tels que : la consommation du combustible, les émissions polluantes, la puissance limitée des sources, les états de charge des éléments de stockage, la durée de vie des composants, etc. Les algorithmes permettant de résoudre ce type de problèmes sont appelés : « stratégies de commande », ou « lois de gestion de l'énergie », ou aussi « stratégies de gestion de l'énergie ».

Pour une application « Smart Grid », la présente thèse est une contribution à la résolution du problème de la gestion de l'énergie d'un système hybride autonome composé de piles à combustible PEM (Proton Exchange Membrane) considérées comme source principale, de batteries lithium-ion et de supercondensateurs utilisés en tant que sources auxiliaires.

Dans le but d'obtenir des lois de gestion de l'énergie garantissant d'avoir la meilleure répartition de puissance en provenance des divers points de production, la commande optimale/plate a été optée.

Basée sur l'équation d'Euler-Lagrange, et sur les propriétés de la platitude différentielle, la stratégie adoptée a permis de satisfaire les demandes énergétiques de la charge, en tenant compte des contraintes principales suivantes :

- Puissance limitée des piles,
- Etat de charge final des batteries, qui doit être ramené à chaque fin de cycle à un seuil fourni par la commande optimale,
- Tension du bus continu, qui doit être stabilisée à sa valeur de référence issue de la commande plate.

Résumé

Mots clés : Smart grid, Gestion de l'énergie, Système hybride autonome, Pile à combustible PEM, Batterie au lithium-ion, Supercondensateur, Commande optimale, Commande plate, Banc d'essai.

تسيير طاقة نظام ذاتي هجين من أجل التطبيق "الشبكة الكهربائية الذكية"

"الشبكة الكهربائية الذكية" هي تسمية لشبكة ذكية وفعالة تستخدم تكنولوجيات المعلومة من أجل تحسين إنتاج، توزيع واستهلاك الكهرباء، مما يؤدي إلى حل مشكل تسيير الطاقة، وزيادة كفاءة الشبكة.

يتمثل مشكل تسيير الطاقة في البحث عن أنسب توزيع للقدرة بين مختلف المصادر التي تشكل شبكة كهربائية ذات بنية هجينة. تتدخل عدة معايير تقييم في اختيار هذا التوزيع، نذكر منها: استهلاك الوقود، الانبعاثات الملوثة، محدودية قدرة المصادر، حالة شحن عناصر التخزين، عمر المكونات، إلخ. الخوارزميات التي تسمح بحل هذا النوع من المشاكل تُسمى: "إستراتيجيات التحكم"، أو "قوانين تسيير الطاقة"، أو أيضاً "إستراتيجيات تسيير الطاقة".

من أجل التطبيق "الشبكة الكهربائية الذكية"، تُعتبر هذه الأطروحة مساهمة في حل مشكل تسيير طاقة نظام ذاتي هجين مُكوّن من خلايا ووقود ذات غشاء تبادل البروتون تمثل المصدر الرئيسي، بطاريات ليثيوم-أيون وسعات كهروكيميائية تُستعمل كمصادر ثانوية.

من أجل الحصول على قوانين تحكم تضمن إيجاد أفضل توزيع للقدرة الواردة من شتى نقاط الإنتاج، تمّ اعتماد التحكمين المثالي وبواسطة التسطح.

إستناداً إلى معادلة أويلر-لاغرانج، وخاصّيات التسطح التفاضلي، مكّنت الإستراتيجية المتبعة من تلبية الحاجيات الطاقوية للحمولة، مع إعتبار القيود الرئيسية التالية:

- محدودية قدرة خلايا الوقود،
- قيمة الشحن النهائي للبطاريات، التي يجب أن تكون مساوية في نهاية كل طور لعتبة يحدّها التحكم المثالي،
- التوتّر بين طرفي الرّابط المستمر، الذي ينبغي أن يكون مستقراً في قيمته المرجعية الناتجة عن التحكم بواسطة التسطح.

الكلمات المفتاحية: الشبكة الكهربائية الذكية، تسيير الطاقة، نظام ذاتي هجين، خلية وقود ذات غشاء تبادل البروتون، بطارية ليثيوم-أيون، سعة كهروكيميائية، التحكم المثالي، التحكم بواسطة التسطح، منضدة اختبار.

Energy management of an autonomous hybrid system for « Smart Grid » application

The « Smart Grid » is a denomination of an intelligent and efficient electric network that uses information technologies to optimize production, distribution and electricity consumption, causing resolution of the problem of energy management, and improvement of the network efficiency.

The problem of energy management consists to research the most suitable power distribution between various sources constituting an electric network having hybrid architecture. Several evaluation criteria intervene when choosing this distribution, such as: fuel consumption, polluting emissions, limited power of sources, lifetime of components, etc. The algorithms allowing to solve this type of problems are called: « control strategies », or « energy management laws », or also « energy management strategies ».

For a « Smart Grid » application, the present thesis is a contribution to the resolution of the problem of energy management of an autonomous hybrid system composed with PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cells considered as the main source, lithium-ion batteries and supercapacitors used as auxiliary sources.

In order to obtain the energy management laws which guarantee to get the best power distribution from different production points, the optimal/flat control was opted.

Based on the Euler-Lagrange equation, and properties of the differential flatness, the adopted strategy has permitted to satisfy the energetic demands of the load, considering the following principal constraints:

- Limited power of fuel cells,
- Final state of charge of batteries, that must be returned in the end of each cycle to a threshold provided by the optimal control,
- DC bus voltage, which must be stabilized to its reference value deduced from the flatness control.

Key words: Energy management, Smart grid, Autonomous hybrid system, PEM fuel cell, Lithium-ion battery, Supercapacitor, Optimal control, Flatness control, Test bench.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Place des piles à combustible, batteries et supercondensateurs dans les smart grids.....	5
1.1. Introduction	6
1.2. La pile à combustible	6
1.2.1. Aperçu historique	6
1.2.2. Principe de fonctionnement.....	7
1.2.3. Types de piles à combustible	8
1.2.4. La pile à combustible PEM	9
1.2.4.1. Tension à vide	10
1.2.4.2. Rendement.....	11
1.3. Le stockage d'énergie.....	12
1.3.1. Plan de Ragone.....	12
1.3.2. Les batteries : une technologie de stockage en constante amélioration	12
1.3.3. La batterie au lithium-ion.....	14
1.3.3.1. Principe de fonctionnement.....	15
1.3.3.2. Eléments technologiques	16
1.3.3.3. Synthèse des caractéristiques	17
1.3.4. Le supercondensateur	18
1.3.4.1. Principe de fonctionnement.....	19
1.3.4.2. Différentes familles	22
1.3.4.3. Systèmes d'équilibrage	22
1.3.4.4. Applications potentielles	24
1.3.4.5. Principales gammes.....	24
1.4. Intégration des piles à combustible dans les smart grids	26
1.4.1. Présentation des smart grids	26
1.4.2. Grands composants d'un smart grid.....	28
1.4.2.1. Les compteurs intelligents.....	28

Table des matières

1.4.2.2. Les villes intelligentes	29
1.4.2.3. Les maison intelligentes	30
1.4.2.4. Les véhicules électriques.....	31
1.4.3. Grands composants d'un smart grid.....	31
1.4.4. Marché mondial des smart grids	32
1.4.4.1. Asie Pacifique	33
1.4.4.2. Etats-Unis	33
1.4.4.3. Union Européenne.....	34
1.5. Conclusion.....	35
Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome.....	36
2.1. Introduction	37
2.2. Schéma électrique du système hybride autonome.....	37
2.3. Dimensionnement énergétique du système hybride autonome	40
2.3.1. Profil de consommation	40
2.3.2. Consommation journalière	40
2.3.3. Dimensionnement du stack de piles à combustible.....	41
2.3.4. Dimensionnement du stack de batteries lithium-ion	41
2.3.5. Dimensionnement du stack de supercondensateurs	42
2.3.6. Dimensionnement des convertisseurs DC-DC.....	44
2.4. Dimensionnement énergétique du système hybride autonome	46
2.4.1. Modélisation du système hybride autonome	47
2.4.1.1. Pertes d'activation	47
2.4.1.2. Pertes ohmiques.....	48
2.4.1.3. Pertes de concentration.....	48
2.4.1.4. Expression de la tension aux bornes du stack en fonction du courant débité	49
2.4.2. Modélisation du comportement du stack de batteries lithium-ion	50
2.4.3. Modélisation du comportement du stack de supercondensateurs	52
2.4.4. Modélisation du fonctionnement des convertisseurs statiques	54
2.5. Conclusion.....	56

Table des matières

Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome	58
3.1. Introduction	59
3.2. Stratégies de commande optées.....	59
3.2.1. Commande optimale	59
3.2.1.1. Principe fondée sur la technique d'Euler-Lagrange	60
3.2.1.2. Principe basé sur l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman.....	61
3.2.2. Commande par platitude	63
3.3. Vérification de la commande hybride optimale/plate proposée.....	65
3.3.1. Description et modélisation du système hybride autonome.....	65
3.3.2. Application de la commande optimale.....	67
3.3.2.1. Principe fondée sur la technique d'Euler-Lagrange	67
3.3.2.2. Principe basé sur l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman.....	71
3.3.3. Application de la commande plate	75
3.3.3.1. Etude de la platitude du système	75
3.3.3.2. Planification de la trajectoire de référence	77
3.3.3.3. Synthèse des lois de commande	77
3.3.4. Asservissement des courants	78
3.3.5. Résultats des tests.....	78
3.3.5.1. Premier test : batteries lithium-ion chargées à leur tension nominale.....	80
3.3.5.2. Deuxième test : batteries lithium-ion chargées à 75%	85
3.3.5.3. Troisième test : batteries lithium-ion complètement chargées.....	87
3.5. Conclusion.....	88
Chapitre 4 : Mise en œuvre expérimentale	89
4.1. Introduction	90
4.2. Nouvelle structure du système hybride autonome	90
4.2.1. Description du banc d'essai expérimental.....	90
4.2.2. Vérification de la commande optimale/plate proposée	91
4.2.2.1. Résultats de simulation.....	92
4.2.2.2. Résultats expérimentaux	98
4.3. Conclusion.....	106

Table des matières

Conclusion générale	107
Références bibliographiques	110

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 1 : Place des piles à combustible, batteries et supercondensateurs dans les smart grids.....	5
Figure 1.1 : Structure de base d'une cellule pile à combustible.....	7
Figure 1.2 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	7
Figure 1.3 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC	9
Figure 1.4 : Exemple de stack chez ZSW (23 cellules)	10
Figure 1.5 : Plan de Ragone	12
Figure 1.6 : Batterie au lithium-ion de la Corporation GS YUASA.....	15
Figure 1.7 : Principe de fonctionnement des accumulateurs au lithium	16
Figure 1.8 : Vue éclatée d'un élément MP176065 de la société Saft.....	17
Figure 1.9 : Différence entre un supercondensateur et un condensateur classique.....	19
Figure 1.10 : Etat déchargé d'un supercondensateur	20
Figure 1.11 : Etat d'un supercondensateur en charge	20
Figure 1.12 : Etat chargé d'un supercondensateur	21
Figure 1.13 : Etat d'un supercondensateur en décharge.....	21
Figure 1.14 : Equilibrage avec résistances	23
Figure 1.15 : Equilibrage avec diodes zéner	23
Figure 1.16 : Élément Maxwell PC2500.....	25
Figure 1.17 : Élément Epcos BCAP0010 B49300-F1276-S	25
Figure 1.18 : Principe de fonctionnement d'un smart grid	28
Figure 1.19 : Principe de fonctionnement d'un système de comptage intelligent et principaux outils associés.....	29
Figure 1.20 : La ville intelligente	30
Figure 1.21 : La maison intelligente	30
Figure 1.22 : Véhicule électrique rechargeable.....	31
Figure 1.23 : Principales fonctionnalités des systèmes énergétiques complexes.....	32

Liste des figures

Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome	36
Figure 2.1 : Schéma électrique du système hybride autonome	39
Figure 2.2 : Profil de consommation	40
Figure 2.3 : Modèle équivalent d'un stack de supercondensateurs	43
Figure 2.4 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de piles à combustible PEM	45
Figure 2.5 : Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC lié au stack de batteries lithium-ion	45
Figure 2.6 : Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC associé au stack de supercondensateurs	45
Figure 2.7 : Caractéristique densité de courant-tension d'une pile PEM	47
Figure 2.8 : Caractéristique $v_{fc} = f(i_{fc})$ du stack de piles à combustible	50
Figure 2.9 : Modèle R-C série de la batterie lithium-ion	50
Figure 2.10 : (a) : Courant constant de charge/décharge de 18.2A ; (b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de batteries	52
Figure 2.11 : Modèle d'un élément supercondensateur	53
Figure 2.13 : (a) : Courant de décharge variant de 0 à 50A ; (b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de supercondensateurs	54
Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome	58
Figure 3.1 : Structure du système hybride autonome	66
Figure 3.2 : Profil de consommation	80
Figure 3.3 : (a) : Puissance consommée par la charge et celle fournie par l'ensemble piles/batteries	80
Figure 3.4 : Transferts des puissances	81
Figure 3.5 : (a) : Tension du bus continu ; (b) : Energie stockée dans le bus continu	82
Figure 3.6 : Courant des batteries	82
Figure 3.7 : (a) : Tension des batteries ; (b) : Quantité de charge stockée dans les batteries pour le premier test	83
Figure 3.8 : (a) : Puissance de référence des supercondensateurs ; (b) : Puissance des supercondensateurs	84

Liste des figures

Figure 3.9 : (a) : Courant des piles ; (b) : Tension des piles	85
Figure 3.10 : (a) : Courant des supercondensateurs ; (b) : Tension des supercondensateurs..	85
Figure 3.11 : (a) : Tension des batteries ; (b) : Quantité de charge stockée dans les batteries pour le deuxième test.....	86
Figure 3.12 : (a) : Tension des batteries ; (b) : Quantité de charge stockée dans les batteries pour le troisième test	87
Chapitre 4 : Mise en œuvre expérimentale.....	89
Figure 4.1 : Photo du banc d'essai expérimental	91
Figure 4.2 : Nouvelle structure du système hybride autonome.....	91
Figure 4.3 : Profil de consommation.....	93
Figure 4.4 : Puissance consommée par la charge et celle fournie par l'ensemble pile/stack1	94
Figure 4.5 : Transferts des puissances.....	94
Figure 4.6 : (a) : Tension du bus continu et sa référence ; Energie stockée dans le bus continu et sa référence.....	95
Figure 4.7 : Courant du stack1	95
Figure 4.8 : (a) : Tension du stack1 ; (b) : Quantité de charge stockée dans le stack1	96
Figure 4.9 : Puissance du stack2 et sa référence	96
Figure 4.10 : (a) : Courant de la pile ; (b) : Tension de la pile.....	97
Figure 4.11 : (a) : Courant du stack2 ; (b) : Tension du stack2.....	97
Figure 4.12 : Courant et puissance consommés par la charge tracés dans l'Interface Homme-Machine (IHM) sous Controldesk.....	99
Figure 4.13 : Profil du courant appelé par la charge pour le premier test.....	99
Figure 4.14 : Puissance sollicitée par la charge pour le premier test	99
Figure 4.15 : Transferts des puissances pour le premier test	100
Figure 4.16 : Tension du bus continu et sa référence pour le premier test.....	100
Figure 4.17 : Energie stockée dans le bus continu et sa référence pour le premier test.....	100
Figure 4.18 : Courant du stack1 pour le premier test.....	101
Figure 4.19 : Tension du stack1 pour le premier test.....	101
Figure 4.20 : Courant à la sortie de l'émulateur pour le premier test	101
Figure 4.21 : Tension à la sortie de l'émulateur pour le premier test	101
Figure 4.22 : Puissance du stack2 pour le premier test	102
Figure 4.23 : Courant du stack2 pour le premier test.....	102

Liste des figures

Figure 4.24 : Tension du stack2 pour le premier test.....	102
Figure 4.25 : Profil du courant appelé par la charge pour le deuxième test.....	103
Figure 4.26 : Puissance sollicitée par la charge pour le deuxième test.....	103
Figure 4.27 : Transferts des puissances pour le deuxième test.....	103
Figure 4.28 : Tension du bus continu et sa référence pour le deuxième test.....	104
Figure 4.29 : Energie stockée dans le bus continu et sa référence pour le deuxième test.....	104
Figure 4.30 : Courant à la sortie de l'émulateur pour le deuxième test.....	104
Figure 4.31 : Tension à la sortie de l'émulateur pour le deuxième test.....	104
Figure 4.32 : Courant du stack1 pour le deuxième test.....	104
Figure 4.33 : Tension du stack1 pour le deuxième test.....	104
Figure 4.34 : Puissance du stack2 pour le deuxième test.....	105
Figure 4.35 : Courant du stack2 pour le deuxième test.....	105
Figure 4.36 : Tension du stack2 pour le deuxième test.....	105

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Place des piles à combustible, batteries et supercondensateurs dans les smart grids.....	5
Tableau 1.1 : Différents types de piles à combustible	8
Tableau 1.2 : Principales données techniques des accumulateurs au lithium-ion	18
Tableau 1.3 : Différentes familles de supercondensateurs.....	22
Tableau 1.4 : Caractéristiques des éléments Epcos et Maxwell	25
Tableau 1.5 : Comparaison entre les caractéristiques des réseaux actuels et ceux des smart grids.....	27
Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome.....	36
Tableau 2.1 : Consommations électriques journalière de l'habitation considérée.....	40
Tableau 2.2 : Paramètres d'une cellule PEM.....	49
Tableau 2.3 : Premier type de fonctionnement des convertisseurs DC-DC	55
Tableau 2.4 : Deuxième type de fonctionnement des convertisseurs DC-DC.....	55
Tableau 2.5 : Troisième type de fonctionnement des convertisseurs DC-DC	55
Tableau 2.6 : Quatrième type de fonctionnement des convertisseurs DC-DC	56
Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome	58
Tableau 3.1 : Paramètres du système hybride autonome	79
Chapitre 4 : Mise en œuvre expérimentale.....	89
Tableau 4.1 : Paramètres du nouveau système hybride autonome	93

Introduction générale

Introduction générale

Partout dans le monde, les énergéticiens sont confrontés à la croissance rapide de la demande en électricité, induite par l'augmentation de la population, l'évolution du taux d'équipement des ménages, et le développement de l'activité économique. Selon les chiffres de l'International Energy Agency (IEA), la production mondiale de l'électricité pourrait être doublée d'ici 2050, passant de 20440 TWh à 45970 TWh [1]. En plus de ces obsessions, les nouveaux usages liés au développement des véhicules électriques, des systèmes de climatisation ou de tout autre équipement peuvent générer des pics de consommation. Généralement fréquents en hiver au moment des grands froids, ces pics ont désormais tendance à se développer quelle que soit l'heure ou la saison. Ainsi, les systèmes électriques doivent se reposer sur un strict équilibre entre la production et la consommation énergétique. Un seul déséquilibre peut entraîner un blackout laissant des milliers voire des millions de personnes privés de l'électricité pendant quelques minutes, quelques heures, ou voire plusieurs jours.

Face à ces inquiétudes, les énergéticiens sont de plus en plus nombreux à se mobiliser pour accroître la qualité, la fiabilité et la sécurité de leurs services. Dans un environnement énergétique en pleine mutation où la raréfaction des énergies fossiles et la diminution des émissions carboniques sont des préoccupations croissantes au niveau international, ils commencent à dessiner les contours d'un réseau électrique dit « intelligent » ou « smart », capable de répondre aux défis environnementaux de l'heure.

La réduction de la pollution environnementale est l'objectif principal des innovations dans les dispositifs de production de l'énergie électrique propre. En raison de leur efficacité et fiabilité, les piles à combustible sont considérées comme l'une des technologies les plus prometteuses. Toutefois, pour aboutir à une utilisation optimale de l'hydrogène (représentant le combustible), plusieurs questions technologiques décisives apparaissent et doivent être résolues dans le cas d'applications réelles. Plus précisément, les caractéristiques de fonctionnement des systèmes à base de piles à combustible sont étroitement liées à leur contrôle et diagnostic. Les problèmes de contrôle ne s'arrêtent pas dans la régulation de la température, du débit et de la pression, car il existe encore une diversité d'indices et variables de performance à optimiser, qui font l'objet d'intenses recherches en cours dont ce travail de thèse fait partie.

Dans le travail de recherche présenté dans cette thèse, et pour une application « Smart Grid », nous nous intéresserons à proposer et définir une technique de contrôle à la fois efficace, robuste et précise afin de gérer d'une façon optimale les flots énergétiques d'un étage hybride totalement autonome à piles à combustible, tout en satisfaisant les contraintes énergétiques pouvant être subites pendant le fonctionnement du système.

Dans de telles architectures, la présence d'une source secondaire d'énergie introduit des degrés de liberté supplémentaires durant la gestion des flux, notamment en raison de la réversibilité qui offre la possibilité de récupérer l'énergie produite à partir de la source principale, et par conséquent augmenter la durée de vie des composants. Pour cette raison, des batteries aux lithium-ion et des supercondensateurs sont choisis, après sélection, pour être associés aux piles à combustible PEM (Proton Exchange Membrane), formant, ainsi, l'étage d'alimentation hybride retenu pour la présente étude.

Afin d'arriver aux objectifs soulignés, cette thèse sera organisée en quatre chapitres :

Dans le but de choisir les éléments de l'architecture hybride considérée, nous commencerons le premier chapitre par une partie sur les piles à combustible et les systèmes de stockage de l'énergie électrique. Dans la seconde, nous donnerons quelques définitions sur les smart grids, dans lesquelles les piles à combustible se qualifieront comme une solution écologique d'avenir irréversible par ce qu'elles se présentent, en plus de leur rendement de conversion important, comme un générateur propre d'énergie, modulable et silencieux.

Le deuxième chapitre discutera le dimensionnement et la modélisation des composants de l'architecture hybride d'alimentation. Les éléments concernés sont :

- Un stack de piles à combustible PEM,
- Un stack de batteries aux lithium-ion,
- Un stack de supercondensateurs,
- Convertisseurs y sont connectés.

Respectivement, les deux étapes précédentes permettront :

- 1) D'assurer un bon fonctionnement du système en suivant une méthodologie de dimensionnement précise, et en caractérisant notamment les dimensions (puissances nominales, valeurs des inductances, etc.) des divers éléments,

- 2) En utilisant des modèles électriques convenables, de mieux comprendre, et de bien privilégier le comportement des différents composants face à des sollicitations données (réponses en tension à des échelons de courant, par exemple).

Le troisième chapitre détaillera les lois de commande optées pour la gestion de l'énergie du système hybride totalement autonome associant des piles à combustible PEM, des batteries aux lithium-ion et des supercondensateurs. Nous présenterons une commande optimale/plate fondée sur deux équations : principes d'Euler-Lagrange et d'Hamilton-Jacobi-Bellman, dont le but sera de gérer les flots énergétiques à travers un bus continu de tension stabilisée.

Les lois de commande devront tenir compte des différentes contraintes que pourra subir le système pendant son fonctionnement, tels que la puissance limitée des piles, et les états de charge finaux des batteries et des supercondensateurs. Il s'agira d'une gestion optimale basée sur le calcul du courant de référence des batteries qui permettra à la fois la minimisation de la puissance fournie par les piles, et le maintien de l'état de charge final des batteries à une valeur issue de la commande optimale.

Possédant une constante de temps inférieure à quelques millisecondes, les supercondensateurs seront chargés de restituer ou récupérer l'énergie nécessaire à la régulation de la tension du bus continu qui variera en fonction de la puissance sollicitée par la charge.

Le quatrième chapitre concernera la mise en œuvre expérimentale des stratégies adoptées en vue de la gestion de l'énergie. Sur un banc d'essai de puissance réduite, les résultats obtenus prouveront la validité et la complémentarité entre les commandes optimale et plate utilisées.

Nous clôturerons ce manuscrit par une conclusion générale ainsi que les perspectives de recherche qui pourront être inscrites comme la pérennité de ce travail.

Chapitre 1 :

Place des piles à combustible, batteries et
supercondensateurs dans les smart grids

1.1. Introduction

Dans le but d'assurer l'alimentation d'une habitation en site isolé, nous présentons dans la première partie de ce chapitre, les piles à combustible dont celles de la filière PEM (Proton Exchange Membrane) est la plus utilisée ; ainsi, nous détaillons ses caractéristiques tels que son principe de fonctionnement, sa tension à vide, son rendement, etc.

Quant à la deuxième partie, elle sera consacrée à la synthèse des caractéristiques des différents éléments de stockage prétendant d'être associées aux piles à combustible afin de constituer une architecture hybride totalement autonome présentant des propriétés intéressantes permettant de faire face aux demandes énergétiques de l'habitation.

L'objectif de la troisième partie sera la découverte futuriste des réseaux électriques intelligents, connu, en anglais, sous le nom : « Smart Grids », ainsi que l'intégration des piles à combustible dans cette nouvelle organisation.

1.2. La pile à combustible

1.2.1. Aperçu historique

Partant de la possibilité de produire de l'électricité à partir de la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène, énoncé pour la première fois en 1802 par l'essayiste américain Henry David, l'avocat britannique William Grove, souvent appelé « père de la pile à combustible », a inventé la première pile à combustible en 1839. À compter de cette date, plusieurs travaux sur la pile à combustible ont été réalisés et nous pouvons citer : travaux de L. Mond et C. Langer en 1889 [2], de W.W. Jacques en 1896 [3], de E. Baur et J. Tobler en 1933 [4], de F.T. Bacon en 1969 [5], et ceux de J. M. Grimwood, B. C. Hacker et P. J. Vorzimmer en 1969 [6].

Malgré ces recherches, le véritable développement de la pile à combustible a été lancé au début des années 1960 lorsqu'un nouvel organisme gouvernemental des Etats Unis d'Amérique « the National Aeronautics and Space Administration (NASA) » rechercha comment produire de l'énergie pour les vols spatiaux. La NASA avait déjà éliminé les batteries car elles étaient trop lourdes, l'énergie solaire source trop chère et l'énergie nucléaire à cause de ces risques. Elle cherchait alors une source alternative et la pile à combustible est

apparue comme une solution possible. Ainsi, la NASA attribua un certain nombre de contrats de recherche qui aboutissent au développement de la première membrane échangeuse de protons ou « membrane d'électrolyte polymère » [7]. Cette filière de piles à combustible était de petite taille et utilisaient de l'oxygène et l'hydrogène purs. En plus de l'intérêt de la NASA, la crise d'énergie de 1973 a relancé le développement de ce système de production. Depuis cette date, la recherche sur les piles à combustible continua et connut des succès dans une grande variété d'applications.

1.2.2. Principe de fonctionnement

Sans aucun processus thermique ou mécanique [7], une pile à combustible est un dispositif de conversion électrochimique de l'énergie chimique contenue dans un combustible [8] en une énergie électrique produite. La réaction électrochimique produit de l'énergie électrique, de l'eau et de la chaleur.

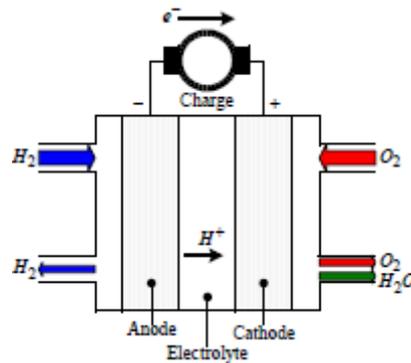


Figure 1.1 : Structure de base d'une cellule pile à combustible [7]

Comme montré sur la figure 1.1, une cellule pile à combustible est formée d'un électrolyte en contact avec une anode et une cathode de chaque côté.

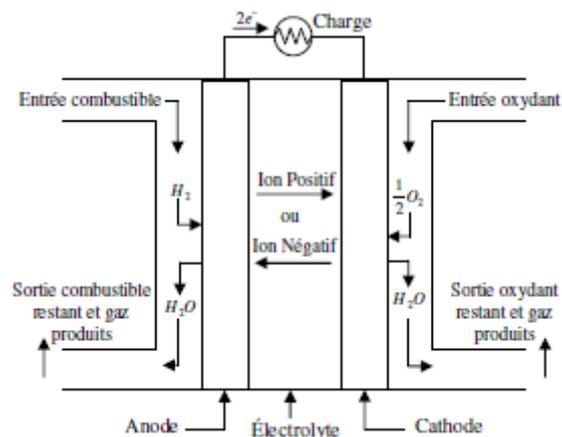


Figure 1.2 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible [8]

Chapitre 1 : Place des piles à combustible, batteries et supercondensateurs dans les smart grids

Une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de combustibles et d'oxydants dont l'hydrogène est le carburant par excellence considérant qu'il possède une plus haute réactivité électrochimique en comparaison avec les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou alcools [7]. Pour l'oxydant, l'oxygène a été reconnu comme le plus efficace à cause de sa haute réactivité et son abondance dans l'air [7].

1.2.3. Types de piles à combustible

Les diverses filières de piles à combustible (PAC) se distinguent principalement selon l'électrolyte utilisé.

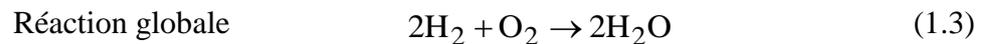
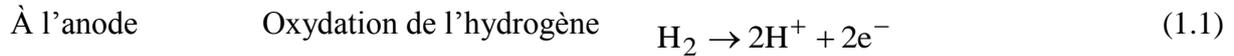
Le tableau 1.1 résume les différents types de piles conventionnelles classées selon le type d'électrolyte, tout en précisant le combustible possible, température de fonctionnement, gamme de puissance, rendement électrique, et applications possibles.

Type de la PAC	Electrolyte	Combustible possible	Température de fonctionnement	Gamme de puissance	Rendement électrique	Applications possibles
AFC	Potasse (KOH) liquide	Hydrogène	50 à 250°C	1W à 100kW	55 – 60%	Spatial, Défense, Equipements portables
DMFC	Membrane en polymère solide	Méthanol	70 à 90°C	1W à plusieurs kW	30 – 45%	Transport, Equipements portable
PEM	Membrane en polymère solide	Hydrogène	70 à 100°C	1W à 10MW	30 – 45%	Spatial, Transport, Stationnaire, Equipements portable
PAFC	Acide phosphorique liquide	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	150 à 220°C	200kW à 10MW	35 – 45% 75% en cogénération	Stationnaire, Cogénération, Transport
MCFC	Sel de carbonate fondu liquide	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	600 à 800°C	500kW à 10MW	50 – 60%	Stationnaire, Cogénération
SOFC	Céramique solide	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	700 à 1050°C	1kW à 100MW	50 – 55% 70% en cogénération	Stationnaire, Cogénération

Tableau 1.1 : Différents types de piles à combustible [9]

1.2.4. La pile à combustible PEM

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEM est décrit par une réaction d'oxydoréduction électrochimique. En fait, l'hydrogène et l'oxygène réagissent pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon les réactions chimiques suivantes :



Ces réactions s'effectuent au sein d'une structure essentiellement composée d'électrodes appelées « l'anode et la cathode » qui jouent le rôle de conducteurs électroniques, et sont séparées par un polymère électrolyte solide représentant le conducteur protonique.

Sur l'anode, les ions issus de la dissociation de l'hydrogène en présence d'un catalyseur traversent le polymère électrolyte en direction de la cathode où ils sont combinés avec l'oxygène et les électrons de la cellule adjacente pour former de l'eau. Ces derniers qui apparaissent du côté de l'anode sont employés dans le circuit électrique externe avant leur retour à la cathode.

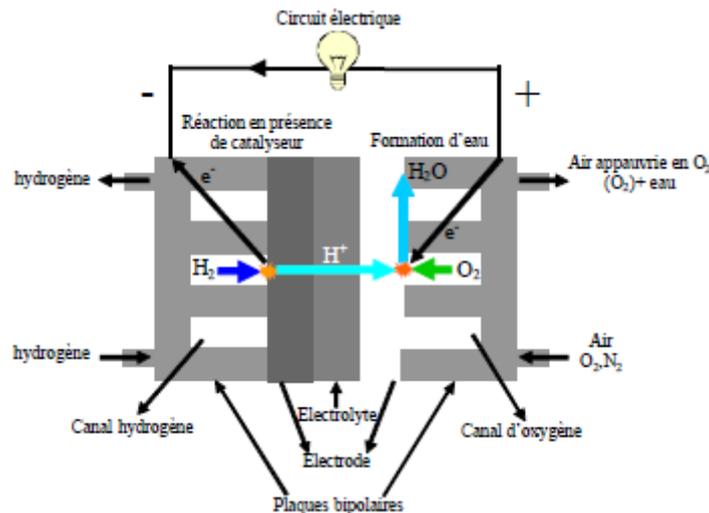


Figure 1.3 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC [9]

La tension nominale d'une cellule élémentaire est de l'ordre de 0,7V [8]. Dans ce cas, pour atteindre les niveaux de tension souhaités, plusieurs cellules doivent être connectées en série pour former ce qu'on appelle un stack qui définit l'empilement des cellules élémentaires.

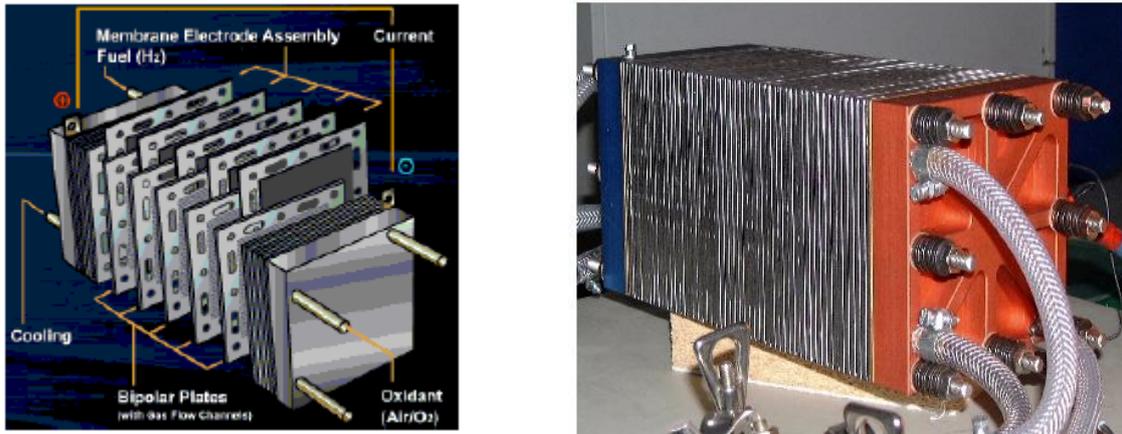


Figure 1.4 : Exemple de stack chez ZSW (23 cellules) [10]

1.2.4.1. Tension à vide

L'énergie chimique libérée par une pile à combustible de type PEM peut être calculée par la variation de l'énergie libre de Gibbs (ΔG_f) qui représente la différence entre l'énergie ΔG_f des produits et ΔG_f des réactifs.

$$\Delta G_f = G_f \text{ des produits} - G_f \text{ des réactifs} = (G_f) \text{ H}_2\text{O} - (G_f) \text{ H}_2 - (G_f) \text{ O}_2 \quad (1.4)$$

L'énergie libre de Gibbs, utilisée pour calculer l'énergie disponible dont elle assure le travail extérieur, dépend de la température, de la pression de l'hydrogène et d'oxygène selon la formule suivante :

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 - RT \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (1.5)$$

Avec :

ΔG_f : énergie libre de Gibbs [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$]

ΔG_f^0 : énergie libre de Gibbs à la pression et température standards. À : 1 bar et 25 °C, $\Delta G_f^0 = -237.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

R : constante universelle des gaz. $R = 8,31451 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [7]

T : température exprimée en Kelvin

P_{H_2} : pression d'hydrogène [bar]

P_{O_2} : pression d'oxygène [bar]

$P_{\text{H}_2\text{O}}$: pression de la vapeur d'eau [bar]

Si toute l'énergie libre de Gibbs serait convertie en énergie électrique, et pour chaque deux électrons (libérés de la réaction d'une mole d'hydrogène) qui passent dans le circuit électrique externe, le travail électrique effectué s'exprime par :

$$\Delta G_f = -2FE \quad (1.6)$$

Où F désigne la constante de Faraday (96 485 coulombs) qui indique la charge électrique d'une mole d'électrons, et E étant la tension de circuit ouvert (ou à vide) d'une cellule PEM.

La tension à vide d'une cellule de pile à combustible PEM peut donc être écrite de la façon suivante :

$$E = -\frac{\Delta G_f}{2F} = -\frac{\Delta G_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (1.7)$$

À l'état standard (1 bar et 25 °C), la tension d'une cellule PEM est égale à 1,229 V [7].

1.2.4.2. Rendement

Le rendement de conversion η_{fc} de l'énergie chimique en énergie électrique est défini comme étant la quantité d'énergie électrique produite (E_{utile}) relative à la variation ΔH_f de l'enthalpie total (positive si l'énergie est récupérée, négative si elle est libérée [11]) de la réaction (1.3).

$$\eta_{fc} = \frac{E_{utile}}{\Delta H_f} \quad (1.8)$$

Dans le cas d'une cellule pile à combustible PEM, la variation de l'énergie libre de Gibbs est disponible comme une énergie électrique utile. Le rendement est alors exprimé par :

$$\eta_{fc} = \frac{\Delta G_f}{\Delta H_f} \quad (1.9)$$

1.3. Le stockage d'énergie

Afin de remédier au problème de fluctuation de puissance, et en scindant les propriétés du stockage en deux (sources d'énergie et de puissance), l'hybridation présente des propriétés très intéressantes et permet de bénéficier de l'apport de chaque source en les sollicitant suivant la satisfaction du profil de consommation de l'utilisateur.

1.3.1. Plan de Ragone

Les différentes sources d'énergie sont souvent caractérisées par leur puissance et énergie massiques spécifiques exprimées en W/kg et en Wh/kg. Ainsi, le plan de Ragone (voir figure 1.5) permet de différencier aisément les différentes technologies de stockage d'énergie.

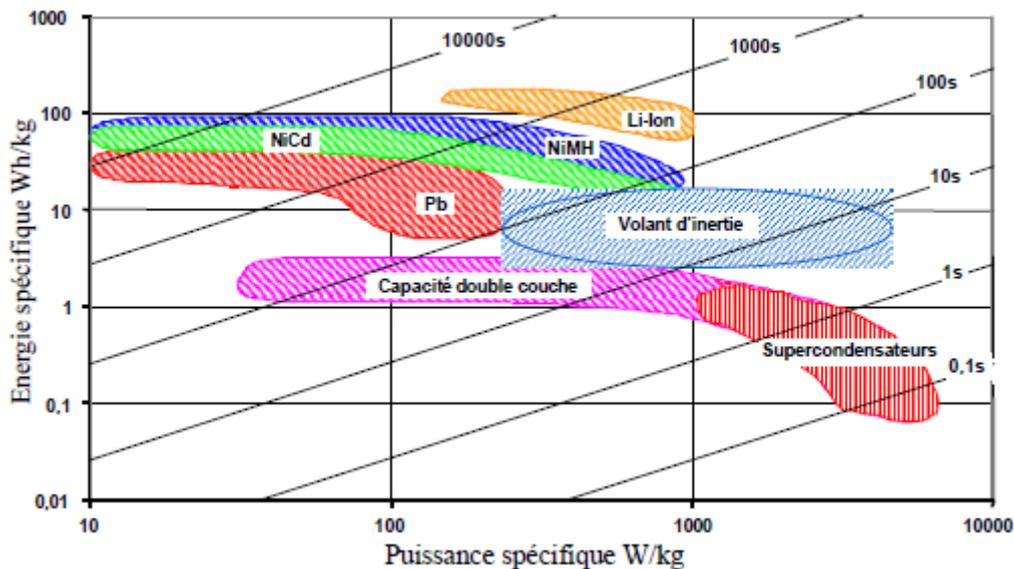


Figure 1.5 : Plan de Ragone [9]

1.3.2. Les batteries : une technologie de stockage en constante amélioration [12]

Les batteries, nommées aussi : accumulateurs, sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Celles-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en Watt-heure [Wh], l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques. Ces dernières sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte lorsqu'une charge, un moteur électrique par exemple, est branché à ses bornes.

L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme batterie est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires (en général rechargeables).

Jusqu'à la fin des années 1980, les deux principales technologies répandues sur le marché étaient les accumulateurs au plomb (pour le démarrage de véhicules, l'alimentation de secours de centraux téléphoniques, etc.) et les accumulateurs nickel-cadmium (outillage portable, jouets, éclairage de secours, etc.). La technologie au plomb, connue plus communément sous le nom de batterie au plomb, est également qualifiée de système au plomb-acide. En effet, les réactions chimiques mises en jeu impliquent l'oxyde de plomb constituant l'électrode positive (improprement appelée cathode) et le plomb de l'électrode négative (anode), toutes deux plongées dans une solution d'acide sulfurique qui constitue l'électrolyte. Ces réactions convertissent le plomb et l'oxyde de plomb en sulfate de plomb, avec formation d'eau. Pour recharger la batterie, elles doivent être inversées par la circulation d'un courant électrique imposé.

Les inconvénients relevés sur la technologie au plomb (poids, fragilité, utilisation d'un liquide corrosif) ont conduit au développement d'accumulateurs alcalins, de plus grande capacité (quantité d'électricité restituée à la décharge) mais développant une force électromotrice moindre (différence de potentiel aux bornes du système en circuit ouvert). Leurs électrodes sont soit à base de nickel et de cadmium (accumulateur nickel-cadmium), ou à base d'oxyde de nickel et de zinc (accumulateur zinc-nickel), soit à base d'oxyde d'argent couplé à du zinc, du cadmium ou du fer (accumulateurs à l'oxyde d'argent). Toutes ces technologies utilisent une solution de potasse comme électrolyte. Celles au plomb, comme les accumulateurs alcalins, se caractérisent par une grande fiabilité, mais leurs densités d'énergie massiques restent relativement faibles (30 Wh/kg pour le plomb, 50 Wh/kg pour le nickel-cadmium) [13].

Au début des années 1990, avec la croissance du marché des équipements portables, deux filières technologiques nouvelles ont émergé : les accumulateurs nickel-métal hydrure et les autres au lithium. La première filière, mettant en jeu une électrode positive à base de nickel et une autre négative constituée d'un alliage absorbant l'hydrogène plongeant dans une solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années 1970, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs au plomb ou au nickel-cadmium employés jusque-là. Les premiers modèles ont ainsi été conçus avec une électrode négative à base de lithium

métallique (filière lithium-métal). Cependant, cette technologie s'est heurtée à des problèmes liés à une mauvaise reconstitution de l'électrode négative de lithium au cours des charges successives. C'est pourquoi, vers le début des années 1980, des recherches ont été faites sur un nouveau type d'électrode négative à base de carbone, utilisé comme composé d'insertion du lithium donnant naissance à la filière lithium-ion.

Les industriels japonais se sont rapidement imposés en tant que leaders dans le domaine. Déjà fabricants d'équipements portables, ils considèrent la source d'énergie faisant partie des composants stratégiques de ces équipements. C'est ainsi que Sony, qui n'était pas à l'origine fabricant d'accumulateurs, décida de mobiliser au cours des années 1980 des ressources considérables afin de faire progresser la technologie et de la rendre industrialisable.

En février 1992, Sony annonçait à la surprise générale le lancement immédiat de la fabrication industrielle d'accumulateurs lithium-ion. Ces premiers accumulateurs offraient des performances limitées (90 Wh/kg). Depuis, celles-ci se sont notablement améliorées (de 160 à plus de 180 Wh/kg en 2004), grâce d'une part aux progrès technologiques réalisés (diminution de la part inutile dans le poids et le volume des accumulateurs) et d'autre part à l'optimisation des performances des matériaux. Des densités d'énergie massiques de plus de 200 Wh/kg sont escomptées vers 2005 [13].

1.3.3. La batterie au lithium-ion

Commercialisés en 1991 par Sony pour des appareils mobiles, les accumulateurs au lithium ont vu le jour seulement en 2005 dans l'industrie automobile [14]. Ils sont fort prometteurs étant donné que leur énergie et puissance massiques, respectivement de 150 Wh.kg⁻¹ et 300 W.kg⁻¹, sont très élevées par rapport aux autres technologies.

Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé. Il est en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'un accumulateur.



Figure 1.6 : Batterie au lithium-ion de la Corporation GS YUASA

1.3.3.1. Principe de fonctionnement

Deux grandes familles d'accumulateurs au lithium existent :

- 1) Les accumulateurs au « Lithium-Carbone » ou « Lithium-Ion »,
- 2) Les accumulateurs au « Lithium-Métal ».

Leur principe de fonctionnement est identique et diffère selon l'utilisation d'une électrode négative à base de carbone graphite ou de lithium métallique.

En cours de son utilisation, et pendant la phase de décharge de l'accumulateur, le lithium relâché par l'électrode négative sous forme d'ions Li^+ migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'insérer dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique). Le passage de chaque ion Li^+ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La figure 1.7.a montre le fonctionnement d'un accumulateur au Lithium-Métal où l'électrode métallique (anode) libère un ion Li^+ qui vient s'insérer dans l'électrode positive (cathode). Dans le cas de l'accumulateur au lithium-ion (figure 1.7.b), les ions Li^+ font un « va-et-vient » entre les deux matériaux d'insertion contenus dans les électrodes positive et négative à chaque phase de charge ou décharge de l'accumulateur.

Pendant la période de charge, les ions Li^+ viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphite. Lors de la période de décharge, la structure en carbone graphite de l'anode libère des ions Li^+ qui viennent se replacer dans la structure de la cathode.

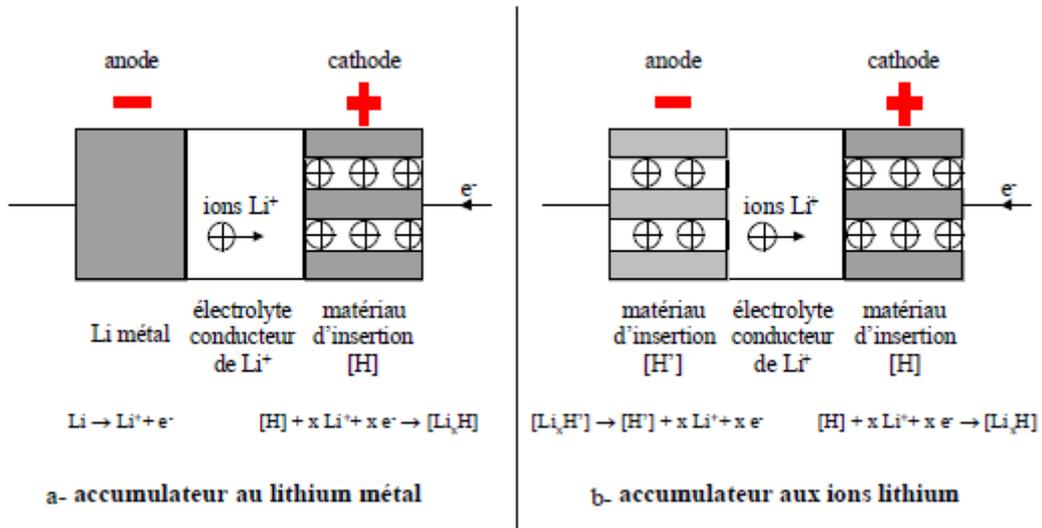


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement des accumulateurs au lithium [15]

1.3.3.2. Eléments technologiques

Un accumulateur électrochimique au lithium-ion se compose généralement de [15] :

a) Electrode positive :

Composée de structure en couches est constituée d'un oxyde du type LiMO_2 (M pour métal) pour les accumulateurs Lithium-Ion. Actuellement, trois oxydes sont utilisés : le LiCoO_2 (lithium-dioxyde de cobalt), LiNiO_2 (lithium-dioxyde de nickel) et LiMn_2O_4 (oxyde ternaire de manganèse-lithium). Vu le coût très élevé de l'oxyde de cobalt allié au lithium, seuls les deux autres oxydes sont utilisés. Pour une électrode positive composée de structures spinelles, les dérivés de LiMn_2O_4 , LiMnO_2 (lithium-dioxyde de manganèse) et de LiFeO_2 (lithium-dioxyde de fer) sont utilisés.

b) Electrode négative :

Réalisée en composés carbonés : graphite, carbones hydrogénés, carbones durs, oxydes mixtes de vanadium amorphes, oxydes mixtes à base d'étain ou d'oxydes mixtes à base de titane. Elle sert de matériau d'insertion, et n'est pas modifiée lors de la réaction.

c) Séparateur :

Constitué d'une membrane polymère microporeuse qui prend les mêmes propriétés que celles des accumulateurs au plomb.

d) Electrolyte :

Une solution de LiPF_6 (lithium hexafluorophosphate) dans un mélange de solvants organiques. Il se trouve soit sous forme liquide ou solide (polymère sec, polymère gélifié ou composé organique vitreux). Sa nature fixe la tension maximale d'utilisation de l'accumulateur.

Pour un polymère sec, la tension maximale ne peut excéder 3.5V, alors qu'elle peut atteindre 4.8V pour un liquide ou un gel. De plus, le transport des ions ne modifiant pas l'électrolyte, la résistance interne est pratiquement indépendante de l'état de charge et ne varie notablement qu'avec la température.

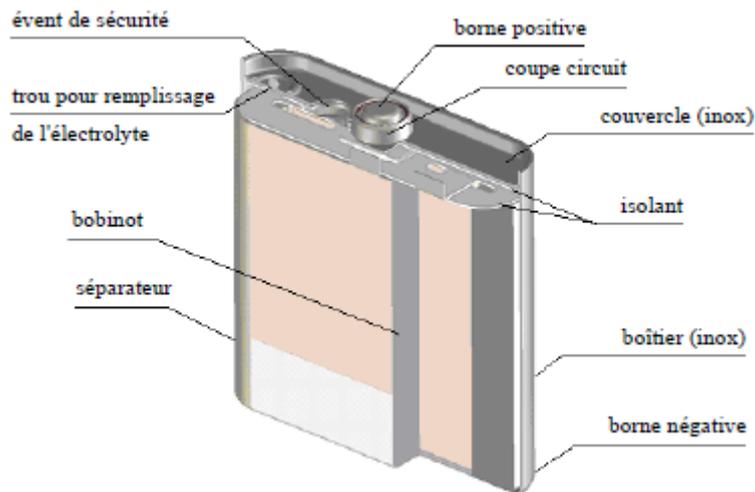


Figure 1.8 : Vue éclatée d'un élément MP176065 de la société Saft [16]

1.3.3.3. Synthèse des caractéristiques

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par trois grandeurs qui sont :

- La densité d'énergie massique (ou volumique), en Watt-heure par kilogramme, Wh/kg (ou en Watt-heure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) de l'accumulateur,
- La densité de puissance massique, en Watt par kilogramme [W/kg], représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse de l'accumulateur,
- Le nombre de cycles « charge/décharge » caractérisant la durée de vie de l'accumulateur.

Chapitre 1 : Place des piles à combustible, batteries et supercondensateurs dans les smart grids

Le tableau 1.2 récapitule les performances techniques des accumulateurs aux lithium-ion de tension 4 Volts.

Température de fonctionnement	0 à 50 °C
Energie	80 à 120 Wh/kg 150 à 250 Wh/dm ³
Nombre de cycles profonds	200 à 1000
Puissance massique	50 à 200 W/kg
Rendement charge/décharge	<ul style="list-style-type: none">▪ Energétique : de 85 à 100 %▪ Faradique : de 90 à 100 %
Autodécharge	10 % par mois
Impact environnemental	<ul style="list-style-type: none">▪ Sels de lithium et oxydes recyclés▪ Solvants polymère et carbone inerte▪ Utilisation du cobalt → très toxique
Sécurité	<ul style="list-style-type: none">▪ Problème de stabilité mécanique▪ Echauffement et risques d'explosion en surcharge▪ Stockage longue durée : 30 à 50 % de l'état de charge

Tableau 1.2 : Principales données techniques des accumulateurs au lithium-ion [17]

1.3.4. Le supercondensateur

Le condensateur inventé au 18^{ème} siècle, en Europe, fût toutefois utilisé de façon pratique par le chimiste anglais Michael Faraday, qui a d'ailleurs donné son nom à l'unité de mesure d'un condensateur, soit le farad [F]. Pour le principe du supercondensateur, il était découvert dans les années 1850 par le physicien allemand Hermann von Helmholtz qui a remarqué que l'application d'une différence de potentiel sur des électrodes provoque le regroupement des ions de l'électrolyte mis en contact avec les électrodes.

Un supercondensateur se présente sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide (voir figure 1.9). L'isolement entre les deux électrodes se fait par l'intermédiaire du solvant contenu dans l'électrolyte. En effet, les supercondensateurs n'exploitent pas la polarisation diélectrique pour le stockage de l'énergie mais la double couche électrique qui apparaît à l'interface électrode-électrolyte.

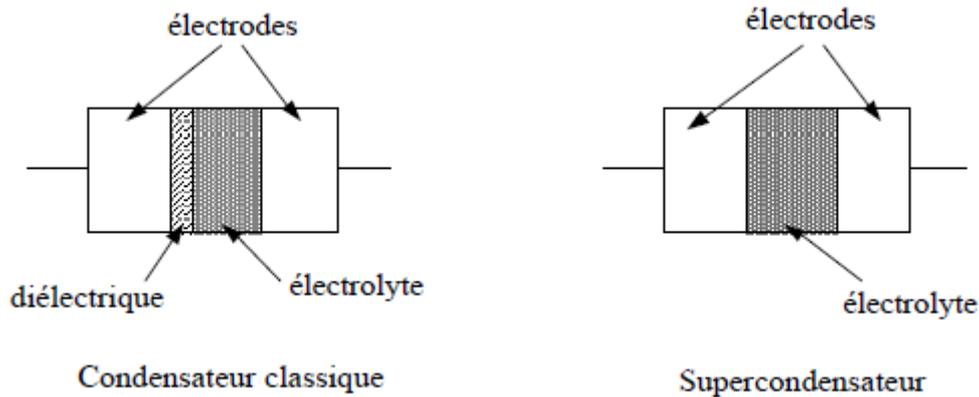


Figure 1.9 : Différence entre un supercondensateur et un condensateur classique [15]

1.3.4.1. Principe de fonctionnement

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

Le principe de fonctionnement peut être décomposé en fonction de quatre états différents du composant [9] :

- Etat déchargé,
- Etat en charge,
- Etat chargé,
- Etat en décharge.

a) Etat déchargé :

À l'état déchargé et sans aucune alimentation, une accumulation de charge se crée spontanément à l'interface électrode-électrolyte aussi bien du côté de l'électrode (q^{el}) que du côté de l'électrolyte (q^{ion}).

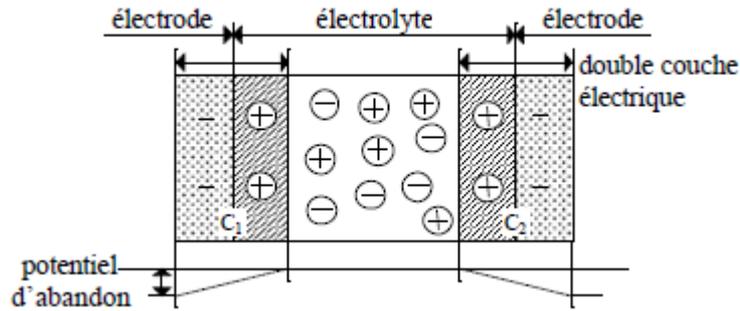


Figure 1.10 : Etat déchargé d'un supercondensateur [9]

q^{el} et q^{ion} sont respectivement les charges de nature électronique et ionique par unité de surface. La condition d'électroneutralité impose $q^{el} = -q^{ion}$. Un potentiel, dit d'abandon apparaît alors à chaque interface, de signe et amplitude spécifiques à chaque couple électrode-électrolyte. Cette accumulation de charges correspond à la double couche électrochimique (son épaisseur est de quelques nanomètres).

b) Etat en charge :

Lors de l'application d'une différence de potentiel aux bornes du supercondensateur, la distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée. L'une d'entre elles passant par son potentiel de charge nulle tandis que l'autre voit augmenter l'accumulation de charges d'où une augmentation du potentiel.

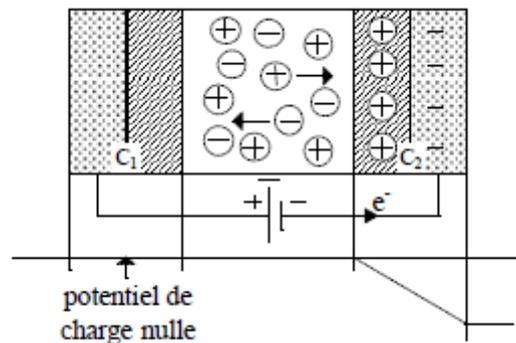


Figure 1.11 : Etat d'un supercondensateur en charge [9]

c) Etat chargé :

Si la charge est poursuivie jusqu'à la valeur maximale U_{max} du potentiel applicable, les deux doubles couches électrochimiques se comportent comme deux condensateurs et voient donc leurs charges augmentées selon une loi du type $Q = CU$.

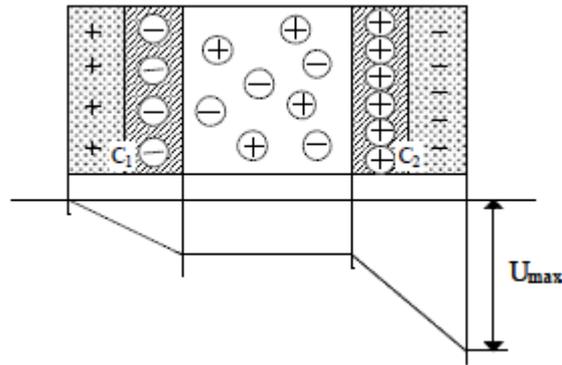


Figure 1.12 : Etat chargé d'un supercondensateur [9]

À l'état chargé, la capacité totale du dispositif résulte des capacités (C_1 et C_2) des deux interfaces en série. Elle est donnée par :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (1.10)$$

d) Etat en décharge :

Lors de la décharge, les ions et les électrons suivent le chemin inverse et un courant électrique est utilisable dans le circuit extérieur.

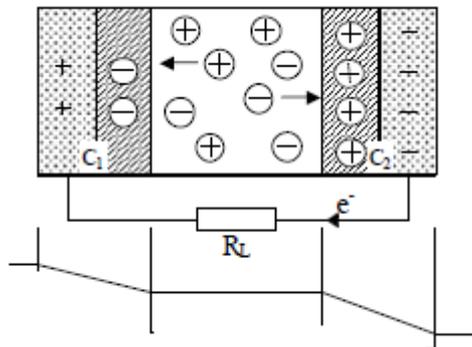


Figure 1.13 : Etat d'un supercondensateur en décharge [9]

Nous remarquons par cette propriété que le supercondensateur développe dans sa structure interne deux capacités contrairement au condensateur classique (qui se situe à l'anode). Pour utiliser au maximum la double couche électrique, les matériaux utilisés pour les électrodes doivent avoir de grande faculté à conduire les charges électroniques qui possèdent des surfaces spécifiques élevées supérieures à 1000 m²/g [9], tel que le carbone activé.

1.3.4.2. Différentes familles

Deux grandes familles de supercondensateurs sont en concurrence, elles se différencient par leurs matériaux d'électrodes et leurs électrolytes.

Electrode	Charbon actif		Matériau métallique	Polymère conducteur
Electrolyte	Acide sulfurique	Organique	Acide sulfurique	Organique
Moyen de stockage de l'énergie	Condensateur de double couche		Double couche + processus faradiques réversibles	
Energie massique [Wh/kg]	0.2 à 1.1	2 à 4.2	2.7 à 5.5	11
Puissance massique [kW/kg]	1 à 10	0.1 à 2	10 à 100	100
Capacité massique [F/g]	120 à 180	60 à 100	≈ 600	200 à 400
Tension [V]	0.8 à 1.2	2 à 3	0.8 à 1.2	2.5
Cyclabilité	> 100000	> 100000	> 100000	10000 à 100000

Tableau 1.3 : Différentes familles de supercondensateurs [15, 18]

1.3.4.3. Systèmes d'équilibrage

La tension maximale en charge d'un élément de supercondensateur est limitée pour des raisons technologiques à une tension de 2.5V. De ce fait, l'utilisation des supercondensateurs dans des applications de forte puissance ne peut se faire qu'on associe plusieurs éléments en série pour pouvoir atteindre des tensions importantes.

L'association en série ne peut se faire simplement, car la valeur de chaque élément varie. Ainsi, les tensions en fin de charge seront différentes entre chaque élément. Pour pallier ce problème, il faut mettre en place un système d'équilibrage de celles-ci. Nous pourrions ainsi exploiter pleinement les capacités de stockage des éléments. De plus, ce système permet d'éviter les surtensions aux bornes des éléments. Différents types de circuits d'équilibrages existent, comme ceux constitués de résistances ou de diodes zéner.

a) Système d'équilibrage avec résistances :

La structure de ce système est très simple puisque elle consiste à connecter une résistance en parallèle avec chaque élément de supercondensateur.

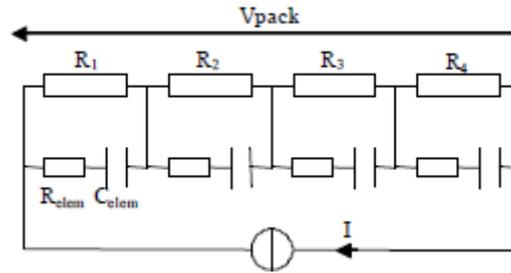


Figure 1.14 : Equilibrage avec résistances [9]

La valeur de la résistance est déterminée par plusieurs critères dont le principal est celui de la limitation de la valeur maximale de la tension aux bornes de l'élément. Cette structure a trois inconvénients :

- Limitation de la dynamique du stack de supercondensateurs,
- Rendement très faible (10 %) lié à la dissipation d'énergie dans les résistances,
- L'équilibrage est calculé pour une valeur de courant donnée.

b) Système d'équilibrage avec diodes zéner :

Les diodes zéner sont mises en parallèle avec chaque élément supercondensateur.

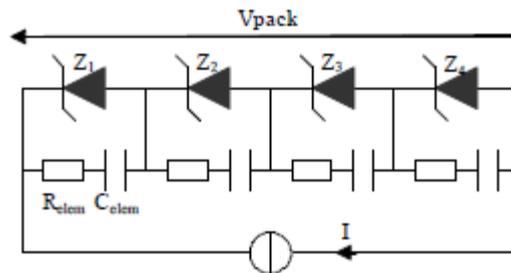


Figure 1.15 : Equilibrage avec diodes zéner [9]

La tension maximale acceptée par les éléments supercondensateurs détermine la tension zéner des diodes. Cette structure offre, par rapport à la première, un meilleur rendement (90 %) et une meilleure dynamique que le système à résistances. Le principal inconvénient de cette solution est l'utilisation des diodes zéner qui dissipent de l'énergie quand la tension aux bornes de l'élément atteint sa valeur maximale. Cette dissipation peut être très importante si beaucoup d'éléments atteignent leurs tensions limites.

1.3.4.4. Applications potentielles

Dans les applications qui se précisent actuellement, les supercondensateurs sont utilisés en remplacement et surtout en complément des piles à combustible et accumulateurs électrochimiques afin d'assurer la fonction puissance qui leur fait défaut. On trouvera ces composants dans les systèmes nécessitant une importante puissance sollicitée en un temps record.

Les principaux secteurs concernés par les supercondensateurs sont [19] :

- L'informatique et la télécommunication pour les petits composants à faible énergie spécifique,
- Les alimentations de secours et l'automobile concernant les composants à haute énergie et haute puissance spécifiques,
- Secteurs d'activités : médical (défibrillateur), industriel (robotique) et militaire (canon électromagnétique).

1.3.4.5. Principales gammes

Un certain nombre d'entreprises ont investi dans la production industrielle des supercondensateurs. Citons en premier lieu les deux précurseurs japonais NEC et Panasonic, dont l'activité "supercondensateurs" a plus de trente années.

Pour les dispositifs de puissance, il s'agit de la société Epcos avec sa gamme Ultracap, et de la société Maxwell avec sa gamme Boostcap Ultracapacitor [20]. Les deux sociétés utilisent la technologie d'électrodes à base de charbon actif pulvérulent que celle à base de tissu de charbon actif, technologie qui conduit à des dispositifs respectivement cylindriques et prismatiques.

Le tableau 1.4 résume les caractéristiques élémentaires des deux principales gammes des supercondensateurs.

Chapitre 1 : Place des piles à combustible, batteries et supercondensateurs dans les smart grids

Constructeur (forme)	Epcos (prisme)	Epcos (cylindre)	Maxwell (prisme)	Maxwell (cylindre)
Tension [V]	2.3	2.5	2.5	2.5
Capacité [F]	100 - 3600	200 - 5000	100 - 2700	450 - 2600
Résistance série [mΩ]	0.8 - 19	0.26 - 3	1 - 13	0.7 - 2.4
Courant nominal [A]	20 - 400	50 - 500	25 - 625	180 - 600
Energie spécifique [Wh.kg ⁻¹]	1.5 - 4.1	3.2 - 5.1	2.2 - 3.2	2.1 - 4.3
Puissance spécifique [kW.kg ⁻¹]	0.7 - 3	4.6 - 9.8	2.2 - 3.2	3.4 - 4.3

Tableau 1.4 : Caractéristiques des éléments Epcos et Maxwell [20]



Figure 1.16 : Élément Maxwell PC2500



Figure 1.17 : Élément Epcos BCAP0010
B49300-F1276-S

1.4. Intégration des piles à combustible dans les smart grids

En dehors des applications spatiales, les premiers modèles de piles à combustible ont été mis sur le marché au début des années 1990. À ce jour, très peu de produits ont atteint une réelle maturité commerciale.

En 2008, les ventes mondiales de piles à combustible pour applications stationnaires ont été de l'ordre de 2250 unités, contre environ 250 en 2001. Il s'agissait principalement (plus de 90 %) des piles PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) de petite puissance (moins de 10 kW). Pour les puissances les plus élevées (50 unités vendues en 2008), ils sont dominées par les piles PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells) et MCFC (Molten-Carbonate Fuel Cells).

Dans le marché des piles à combustible, principalement pour les unités de petite puissance qui peuvent s'adresser au secteur résidentiel-tertiaire, dont certaines applications spécifiques sont envisagées, une tendance observée depuis une dizaine d'années est nettement en croissance surtout dans les domaines suivants :

- * Installations de secours,
- * Micro-cogénération,
- * Alimentations des sites isolés,
- * Réseaux électriques intelligents.

Pour le dernier champ d'application, connu, en anglais, sous le terme « Smart Grids », les systèmes à base de piles à combustible constituent une solution écologique d'avenir grâce à leurs multiples avantages.

1.4.1. Présentation des smart grids

Les smart grids sont les réseaux de distribution du futur qui réuniront les technologies de l'électricité et de l'information [21]. Ils seront capables de [22] :

- Optimiser la production et la distribution,
- Mieux mettre en relation l'offre et la demande entre les producteurs et consommateurs d'électricité,
- Assurer la sécurité de fonctionnement du réseau en présence de production décentralisée intermittente et aléatoire (systèmes solaires, éoliens, etc.).

Chapitre 1 : Place des piles à combustible, batteries et supercondensateurs dans les smart grids

Par rapport aux smart grids, les réseaux électriques existants sont unidirectionnels. L'énergie électrique, produite de manière centralisée, est amenée via des réseaux de distribution chez les consommateurs. Du point de vue énergétique, ce système est peu efficace : seul environ 30% de l'énergie primaire disponible est convertie en électricité, et 8% de la production électrique est dissipée par effet Joule dans les lignes électriques.

De même, 20% de la capacité installée n'est utilisée que lors des pics de consommation. De plus, de part leurs structures hiérarchiques et interdépendantes, les systèmes électriques actuels sont particulièrement sensibles aux défaillances en cascade pouvant, par effet dominos, mener à des pannes généralisées (à titre d'exemple : le blackout survenu au nord-américain en date du 14 Août 2003 : en raison de défaillances en cascades, environ 50 millions d'habitants des états du Nord-Est se sont retrouvés plongés dans le noir).

Enfin, la majorité des défauts surviennent dans les réseaux de distribution, réseaux non maillés et peu ou pas instrumentés, abaissant ainsi la qualité de service et la fiabilité globale des équipements électriques.

Les smart grids se différencient des réseaux actuels par leur aspect, fonctionnement, mission et déploiement.

Le tableau 1.5 énumère les principales différences par comparaison des caractéristiques de chaque réseau.

Caractéristiques des réseaux actuels	Caractéristiques des smart grids
Hiérarchique	Maillé
Production centralisée	Production décentralisée et centralisée
Uni-directionnel	Multi-directionnel
Electromécanique	Numérique
Peu instrumenté	Complètement instrumenté
Peu de contrôle	Flexible
Un seul acteur économique	Choix du fournisseur

Tableau 1.5 : Comparaison entre les caractéristiques des réseaux actuels et ceux des smart grids [21, 23]

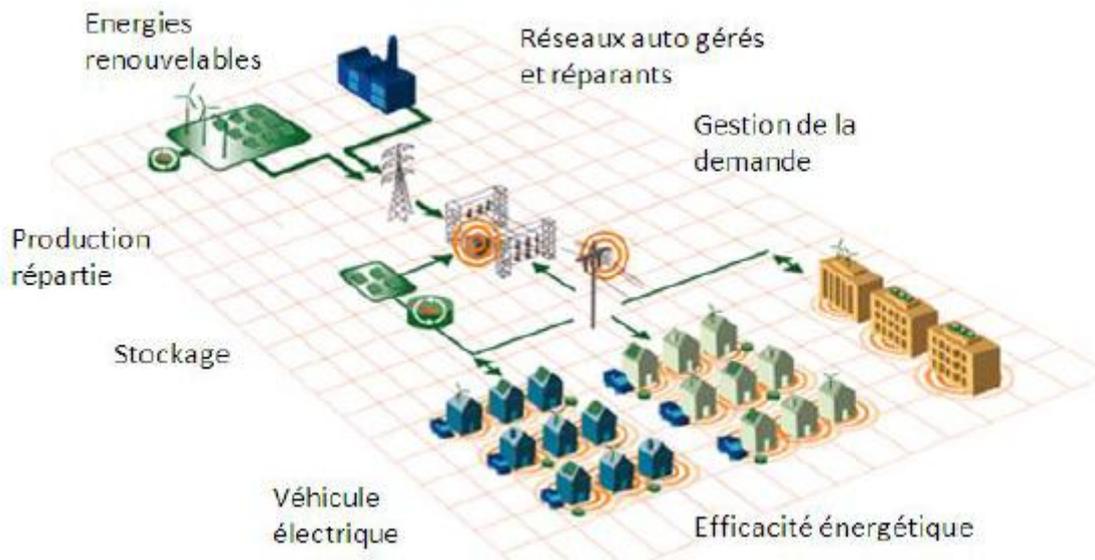


Figure 1.18 : Principe de fonctionnement d'un smart grid

1.4.2. Grands composants d'un smart grid [24]

Dans un univers marqué par des contraintes réglementaires en constante évolution, par des clients de plus en plus attentifs à leur consommation, et par des pressions politiques alimentées par la prise de conscience écologique de l'opinion publique, la priorité est de concilier l'offre et la demande tout en minimisant l'impact du carbone. Dans cette perspective, le développement des « smart grids » s'inscrit désormais comme une nécessité pour répondre à ces nouvelles attentes.

Pour accompagner cette révolution technologique des smart grids, la gestion intelligente de l'énergie s'appuiera sur quatre grands composants liés les uns aux autres, à savoir :

- 1) Les compteurs intelligents,
- 2) Les villes intelligentes,
- 3) Les maisons intelligentes,
- 4) Les véhicules électriques.

1.4.2.1. Les compteurs intelligents

Ils constituent la première étape vers un réseau intelligent. Le déploiement de compteurs évolués associés à un premier réseau de télécommunication bidirectionnel est la pierre angulaire des futurs réseaux électriques. Toutefois, cette première phase conduit

généralement à des retours sur investissements faibles basés, principalement, sur des économies.

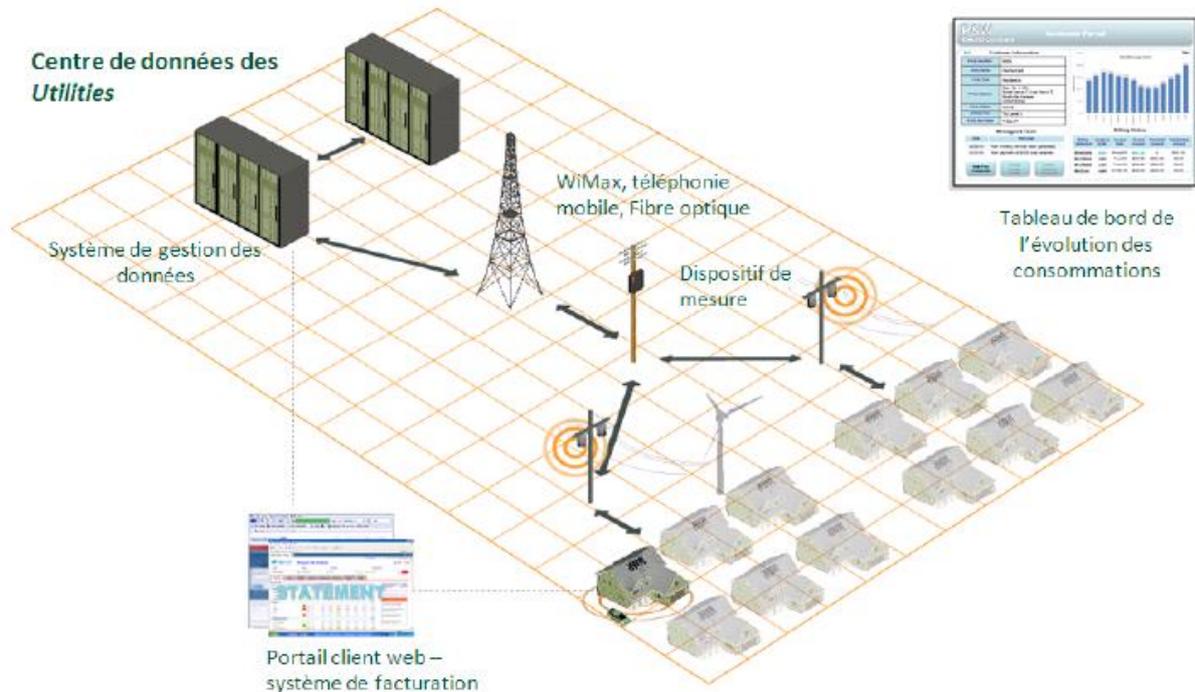


Figure 1.19 : Principe de fonctionnement d'un système de comptage intelligent et principaux outils associés

1.4.2.2. Les villes intelligentes

La déclinaison du smart grid au réseau local est l'une des pistes à prendre en considération et à donner importance afin de faire évoluer les systèmes énergétiques dans un modèle flexible, et participer largement au développement des « villes intelligentes et durables ». Pour cette raison, des actuelles initiatives viseront à coordonner les productions décentralisées à base des énergies renouvelables, moyens de stockage, sites de consommation, et infrastructures de recharge des véhicules électriques, sont en cours de développement.

D'autres projets de type éco-quartiers seront aussi très intéressants.



Figure 1.20 : La ville intelligente

1.4.2.3. Les maisons intelligentes

Ce type de maisons présente l'évolution numérique du réseau électrique domestique couplé avec les systèmes de comptage intelligent. Des dispositifs de technologies avancées permettront le pilotage énergétique des usages domestiques en les optimisant en fonction des intérêts préalablement définis par le client et la communauté. L'automatisation et l'optimisation des consommations et sources d'approvisionnement sont des pistes de services valorisables auprès des consommateurs.

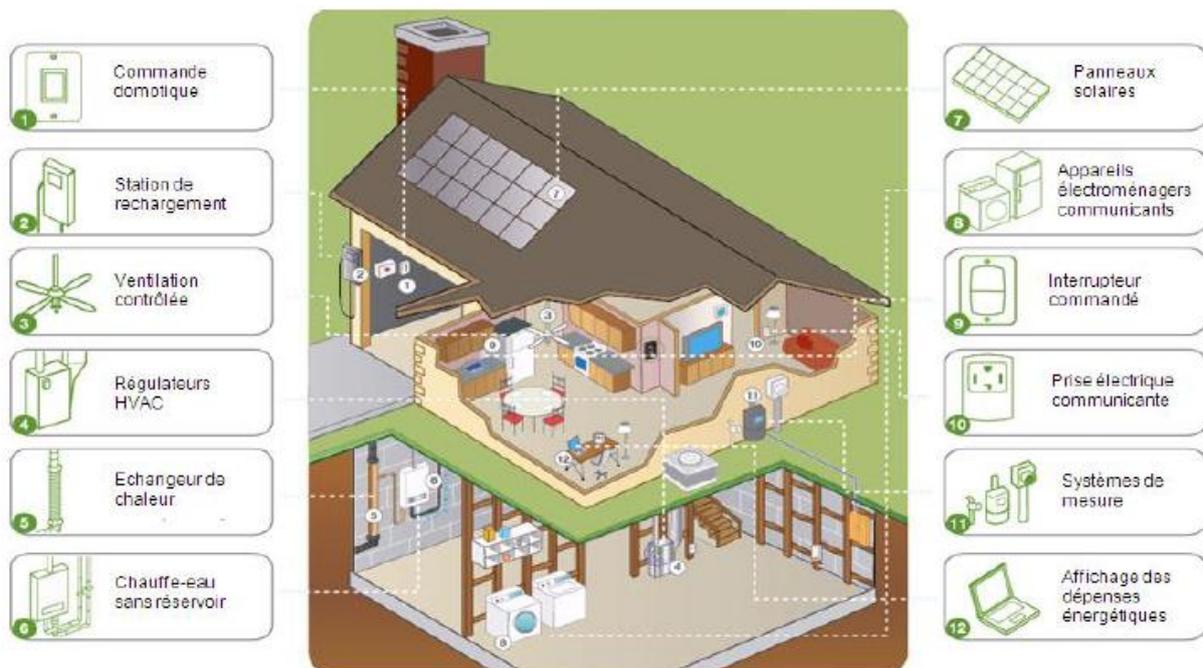


Figure 1.21 : La maison intelligente

1.4.2.4. Les véhicules électriques

Les véhicules électriques hybrides rechargeables ou bien totalement électriques promettent un transport décarboné, et ouvrent la porte à de nouveaux marchés aux énergéticiens, sous réserve de forts investissements au niveau des réseaux de distribution et des infrastructures de recharge. Les recherches en matière de stockage d'énergie à bord accompagnant le développement de ces véhicules pourraient demain trouver des débouchés à différentes mailles du réseau et conduire à repenser intégralement la gestion de ceux-ci.



Figure 1.22 : Véhicule électrique rechargeable

1.4.3. L'environnement « Electricité » d'un smart grid

Les smart grids, ou réseaux électrique intelligents, visent à intégrer de manière efficiente les actions de l'ensemble des utilisateurs (producteurs et consommateurs) afin de garantir un approvisionnement électrique durable, sûr et au moindre coût. Les smart grids font appel à l'intelligence énergétique en associant les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) [25]. Les systèmes communiquant, en parallèle des réseaux de distribution, ainsi que l'intelligence embarquée doivent permettre un meilleur ajustement entre production et consommation d'électricité et l'intégration des énergies renouvelables.

Jusqu'à présent, les réseaux électriques utilisés ont une architecture centralisée et une communication unidirectionnelle : du producteur vers le consommateur. Le déploiement des smart grids accompagne la modernisation des réseaux et des infrastructures vers une architecture décentralisée.

L'objectif est d'intégrer une multitude de sources d'énergie renouvelable de toutes tailles, et de créer de nouveaux modes d'utilisation et de stockage de l'électricité (comme les

véhicules électriques). À l'intérieur de ce réseau électrique évolué, le consommateur final disposera des outils et services qui lui permettront de connaître sa consommation d'énergie et d'interagir en temps réel.

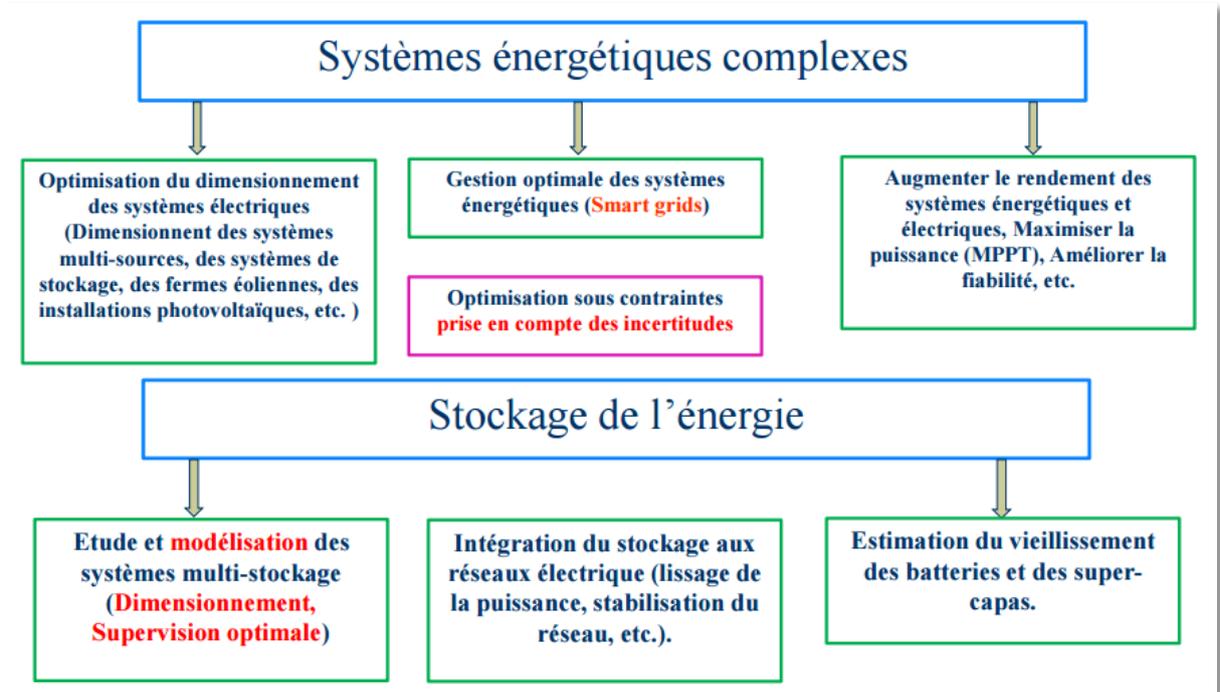


Figure 1.23 : Principales fonctionnalités des systèmes énergétiques complexes

Comme démontré sur la figure 1.23 présentant les principales fonctionnalités des systèmes énergétiques complexes, la gestion optimale de l'énergie avec prise en compte des incertitudes (gestion sous contraintes) est l'une des étapes essentielles vers un smart grid [26]. Dans ce travail de thèse, nous sommes intéressés à cette démarche en procédant à deux étapes principales :

- 1) Gestion optimale de l'énergie,
- 2) Réglage de la tension aux bornes du bus capacitif à la sortie du système considéré.

1.4.4. Marché mondial des smart grids [27]

La thématique des « réseaux et systèmes électriques intelligents » est identifiée dans de nombreux pays comme un axe prioritaire de recherche et de démonstration, les exemples de déploiement massif étant encore rares.

Le nombre de projets en ce domaine est en constante augmentation de par le monde, selon le contexte, le pays, le mode de régulation, etc. Les champs thématiques des projets et

programmes présentés concernent généralement la gestion de la demande, la pénétration des énergies renouvelables, l'évolution de l'architecture des réseaux, et notamment le concept de micro-réseaux, ainsi que le développement de modèles d'affaires favorables à l'émergence des réseaux intelligents.

Trois groupes de pays ont été retenus pour cet état des lieux : Asie Pacifique, Etats Unis et Union Européenne.

1.4.4.1. Asie Pacifique

La région est vaste et présente des différences considérables entre les pays. La Corée du Sud, le Japon et la Chine envisagent des développements de réseaux intelligents dans leur acception large et à l'échelon national. L'Australie, l'Inde et l'Indonésie semblent plutôt s'orienter vers l'amélioration de l'efficacité des réseaux existants au travers des programmes de taille plus limitée.

Actuellement, au travers notamment des réalisations de l'agence gouvernementale japonaise NEDO, le Japon peut être considéré comme le leader mondial en matière de démonstrateurs de recherche. Ceux-ci portent essentiellement sur la forte pénétration de production décentralisée dans les réseaux de distribution et/ou micro-réseaux : les plateformes de démonstration en fonctionnement visent principalement à démontrer la faisabilité technique des micro-réseaux intégrant une forte proportion d'énergies renouvelables et/ou décentralisées (par exemple : micro-cogénération et piles à combustible en usage stationnaire).

1.4.4.2. Etats-Unis

Aux Etats Unis d'Amérique, la sûreté du système électrique, l'augmentation de la consommation et la difficulté croissante à construire de nouvelles lignes de transport d'électricité sont à l'origine des travaux concernant les réseaux intelligents.

Une des premières actions programmées concerne l'établissement d'une cartographie des besoins en matière de normes d'échange d'informations et d'interopérabilité des systèmes, ainsi que la réalisation d'un plan d'action dans ce domaine. Ces travaux avaient été anticipés et sont donc soutenus par de nombreux programmes de recherche couvrant des champs thématiques très vastes :

- La distribution est le secteur le plus avancé, avec en perspective les premiers déploiements opérationnels : compteurs communicants, automatisation des réseaux, etc.,
- Le transport, la production et le stockage sont assez bien représentés dans ces programmes (analyse des technologies, développements informatiques, services transverses, protocoles, etc.),
- Les postes électriques et les usages finaux sont peu concernés, mais la lacune majeure de ces programmes réside dans le manque de travaux intéressants dans les environnements : marché et régulation.

1.4.4.3. Union Européenne

Les initiatives européennes se sont centrées sur l'intégration des sources d'énergie renouvelable dans le mix de production, tout en s'attachant à accroître l'implication des utilisateurs finaux dans la gestion du système, à travers des politiques de gestion de la demande et du déploiement d'infrastructures de comptage communicant.

Dans quelques pays, plusieurs projets ont été déployés et sont en exploitation, en général sur un nombre limité de technologies de réseau intelligent (le plus souvent des systèmes de comptage communicant ou des dispositifs de communication adaptés à l'exploitation des ouvrages).

Les pays scandinaves sont en ligne afin de répondre à des objectifs de maîtrise de la demande d'énergie et de la mise en place de l'ouverture des marchés. Cependant, le projet Italien Telegestore, déployé par Enel Distribuzione, est de loin le plus avancé, avec 33 millions de compteurs communicants en fonctionnement depuis plusieurs années, un haut niveau d'automatisation d'un grand nombre de postes de distribution, des outils avancés d'exploitation et de gestion des actifs, etc.

D'autres projets intégrant des technologies du réseau intelligent sont engagés aux Pays Bas : Smart City, en Allemagne : développement de nouveaux composants, flexibilité des réseaux, branchement des véhicules électriques sur les réseaux, etc., au Portugal : InnovGrid, en Espagne : Smart Cities, et en France : projets Multisol, Premio, LINKY (expérimentation de compteurs communicants auprès de 30 milles consommateurs), ainsi que les projets FAC (Fonctions Avancées de Conduite) et FAR (Fonctions d'Automatisation des Réseaux)

intéressant les réseaux moyenne tension. Les projets de recherche et de démonstration financés dans le cadre des 5^{ème} et 6^{ème} Plans-Cadre de Recherche et de Développement (PCRD) européens ont permis d'identifier les options technologiques, économiques et institutionnelles favorables à une transition vers les réseaux intelligents.

1.5. Conclusion

L'évolution croissante des modes de consommation et d'usage de l'électricité impose de développer, au sein des systèmes électriques, des dispositifs de production, de stockage, de régulation et de pilotage aptes à conférer une très grande flexibilité au jeu de l'offre et de la demande d'énergie.

Toutefois, la gestion énergétique optimale et le réglage des niveaux de tension constituent et restent des démarches très importantes vers le réseau électrique du futur dit : « Smart Grid ». Dans la suite de ce travail, ces deux étapes seront détaillées.

Chapitre 2 :

Dimensionnement et modélisation d'un
système hybride piles à combustible
totalement autonome

2.1. Introduction

Pour répondre aux demandes en puissance de l'habitat considéré, nous allons exposer dans ce chapitre, le dimensionnement et la modélisation des composants d'un système d'alimentation hybride totalement autonome.

À partir du chapitre précédent, la synthèse des caractéristiques des différents éléments de stockage nous a permis de choisir, en plus des piles à combustible PEM, un stockeur hybride « batteries lithium-ion/supercondensateurs » combinant les avantages des deux technologies à la fois : énergie spécifique élevée pour la première, puissance spécifique importante pour la seconde.

2.2. Schéma électrique du système hybride autonome retenu

Pour la présente étude, et à partir du tableau 1.1, la pile à combustible de la technologie PEM se place comme le choix le plus adéquat pour les raisons essentielles suivantes [8-9] :

- ✓ Son rendement de conversion important,
- ✓ Sa densité de puissance massique la plus élevée,
- ✓ Contrairement à la pile AFC, elle est insensible à la présence d'oxyde de carbone dans l'air,
- ✓ Pour les piles fonctionnant à haute température, la dégradation des matériaux est assez élevée diminuant ainsi leur durée de vie,
- ✓ Démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante,
- ✓ Sa membrane solide imperméable aux fuites dues aux vibrations.

D'une façon générale, les piles à combustible utilisées en tant que générateurs d'électricité présentent certains points faibles :

- Elles ne permettent pas de récupérer l'énergie,
- Les variations rapides du courant délivré et les ondulations correspondantes conduisent à la réduction de leur durée de vie [28-30],
- La tension de sortie dépend du courant délivré et varie fortement avec la charge,
- Leur temps de réponse est limité,
- Leur démarrage à froid est difficile [31].

Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome

Toutes ces raisons convergent vers :

- 1) L'utilisation d'un dispositif de conversion continu-continu souvent représentée par un convertisseur élévateur de tension entre les piles et la charge à alimenter [32],
- 2) L'association aux piles à combustible d'autres sources auxiliaires, nécessitant ainsi, la présence de plusieurs convertisseurs statiques.

Afin de faire face aux demandes énergétiques croissantes d'une habitation situant en site isolé (alimentation autonome), le système de stockage sélectionné doit répondre à [8, 33] :

- Une forte densité d'énergie avec une grande constante de temps (dynamique faible),
- Une forte densité de puissance avec une faible constante de temps (dynamique élevée),
- Une aptitude de réaliser un très grand nombre de cycles « charge/décharge ».

L'analyse de la figure 1.5 prouve que l'hybridation permet de séparer la fonction énergie de la fonction puissance. Dans ce cas :

- La fonction énergie sera assurée par les batteries au lithium-ion,
- La fonction puissance sera attribuée aux capacités double couche, appelées aussi : supercondensateurs.

De ce fait, nous pouvons déduire que le système de stockage hybride « batteries aux lithium-ion/supercondensateurs » est le plus adéquat pour être associé aux piles à combustible PEM.

Les progrès constants réalisés sur les composants de puissance ont permis aux convertisseurs statiques basse tension continu-continu (DC-DC) non isolés d'être les plus prisés [34]. Ils présentent les avantages suivants :

- Un rendement de conversion important,
- Un faible poids,
- Une facilité à commander,
- Ils permettent de réduire l'ondulation du courant d'entrée et celle de la tension de sortie,
- Ils possèdent un rapport de transformation élevé.

En raison de ces avantages, notre choix pour ce travail s'est orienté vers cette famille de convertisseurs.

Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome

En résumé, le système hybride autonome sur lequel porte cette étude est composé de piles à combustible PEM connectées sur un bus capacitif (de tension variable) par l'intermédiaire d'un convertisseur statique DC-DC non isolé noté : CVS Boost, et d'un système hybride de stockage d'énergie de type « batteries/supercondensateurs » connecté sur le même bus par l'intermédiaire de deux autres convertisseurs statiques DC-DC non isolés notés : CVS Buck/Boost. À l'extrémité du bus sont connectées des charges alternatives alimentées à partir du bus à travers un onduleur monophasé en pont. Cette extrémité est modélisée par une résistance variable (RV) de valeur déterminée en fonction de la variation de la puissance consommée par la charge pendant une journée de fonctionnement.

La tension aux bornes des piles à combustible étant inférieure à celle du bus continu, le convertisseur utilisé pour relier cette source au bus doit être élévateur de tension (de type Boost). Le système de stockage d'énergie étant un élément qui peut être chargé ou déchargé, les convertisseurs adoptés pour connecter ce système au bus doivent être réversibles en courant (de type Buck/Boost).

Le schéma électrique du système hybride à piles à combustible est représenté sur la figure 2.1.

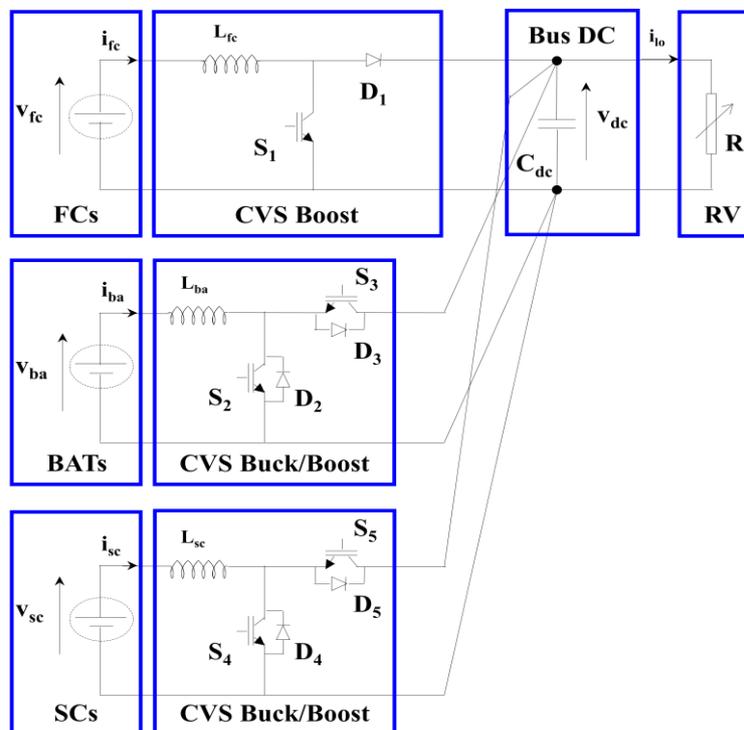


Figure 2.1 : Schéma électrique du système hybride autonome

2.3. Dimensionnement énergétique du système hybride autonome

Avant toutes études d'un système, le dimensionnement de ses composants reste une étape déterminante afin d'assurer un bon fonctionnement durant toute la période d'utilisation. Pour cela, le choix des composants devra être effectué suivant une méthodologie bien précise.

2.3.1. Profil de consommation

Dans ce paragraphe, nous avons défini un profil de consommation horaire basé sur les habitudes d'utilisation au cours de la journée des appareils électriques comme les lampes, réfrigérateur, etc.

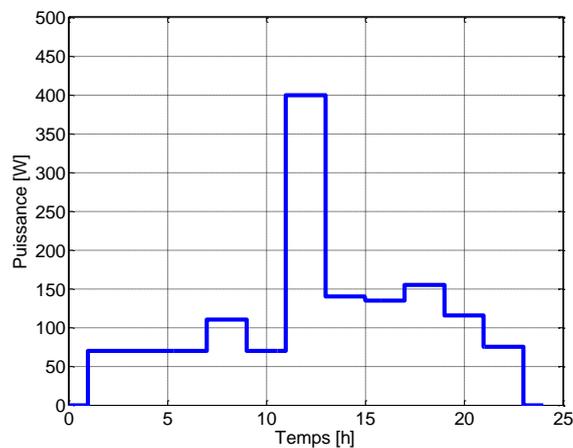


Figure 2.2 : Profil de consommation

2.3.2. Consommation journalière

Le tableau 2.1 expose le type des charges et leur nombre, ainsi que la consommation électrique journalière [35-37].

Charge	Nombre d'éléments	Puissance [W]	Durée d'utilisation [h]	Consommation journalière [Wh/j]
Lampes fluo	5	20	4	400
Réfrigérateur	1	70	10	700
Congélateur	1	120	10	1200
Téléviseur	1	75	4	300
Machine à laver	1	300	1	300
PC	1	40	4	160
Total		705		3060

Tableau 2.1 : Consommations électriques journalières de l'habitation considérée

Ces équipements demandent une puissance de 705W et une consommation journalière de 3060Wh/j.

2.3.3. Dimensionnement du stack de piles à combustible

Le stack de piles à combustible représente la source principale d'énergie du système hybride. Son dimensionnement consiste à déterminer le nombre des cellules PEM en série et en parallèle permettant de faire face aux demandes de l'habitat suivant le profil de puissance montré sur la figure 2.2.

Le stack de piles à combustible qui doit alimenter un bus capacitif de tension $V_{dc} = 48V$, est connecté au bus à travers un convertisseur statique de type Boost. Afin d'obtenir un rendement optimal du convertisseur associé, il faut que la tension du stack soit au minimum égale à $V_{dc}/2$ (soit 24V) [8, 11]. Pour une tension limite V_{fcell} de 0.6V [38], le nombre des cellules montées en série est donné par :

$$N_{fcs} = \frac{V_{dc}}{2V_{fcell}} = 40 \quad (2.1)$$

La cellule de pile à combustible utilisée à une puissance P_{fcell} de 64W. Pour un stack de 300W, le nombre des cellules construites en parallèle est :

$$N_{fcp} = \frac{P_{stack}}{P_{fcell}} = 5 \quad (2.2)$$

2.3.4. Dimensionnement du stack de batteries lithium-ion

Le dimensionnement du stack de batteries requiert une attention particulière afin d'augmenter sa durée de vie et par la même occasion assurer l'autonomie du système et diminuer le coût global du système.

La capacité nominale du stack est déterminée à partir de la relation (2.3).

$$C_{ban} = \frac{E_{ba} \times Aut}{V_{ba} \times D_{ba}} \quad (2.3)$$

Avec :

C_{ban} : capacité nominale du stack [Ah]

E_{ba} : énergie journalière à stocker dans le stack [Wh/j]

Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome

Aut : nombre de jours d'autonomie

V_{ba} : tension nominale du pack [V]

D_{ba} : profondeur de décharge du stack [%]

Nous souhaitons obtenir une autonomie d'un jour avec une tension nominale de 28.8V, une profondeur de décharge de 90% et une énergie journalière à stocker de 4707.7Wh. Dans ce cas, le stack de batteries lithium-ion devrait avoir une capacité nominale d'environ 182Ah.

Pour déterminer le nombre de batteries constituant le stack, nous avons sélectionné une batterie élémentaire ayant une capacité et tension nominaux de 30Ah et 3.6V.

Les équations (2.4) et (2.5) permettent de calculer les nombres N_{bas} et N_{bap} des batteries en série et en parallèle.

$$N_{bas} = \frac{V_{ba}}{V_{bacell}} = 8 \quad (2.4)$$

$$N_{bap} = \frac{C_{ba}}{C_{bacell}} = 6 \quad (2.5)$$

2.3.5. Dimensionnement du stack de supercondensateurs

Le dimensionnement d'un stack de supercondensateurs consiste à déterminer les nombres N_s et N_p des éléments qu'il faut placer en série et en parallèle en fonction de l'énergie maximale transférée et de la puissance maximale qui va être extraite du stack.

Comme illustré sur la figure ci-dessous, le modèle équivalent d'un stack de supercondensateurs peut être représenté par une capacité C_{sc} en série avec une résistance R_{sc} [8-9, 12, 39].

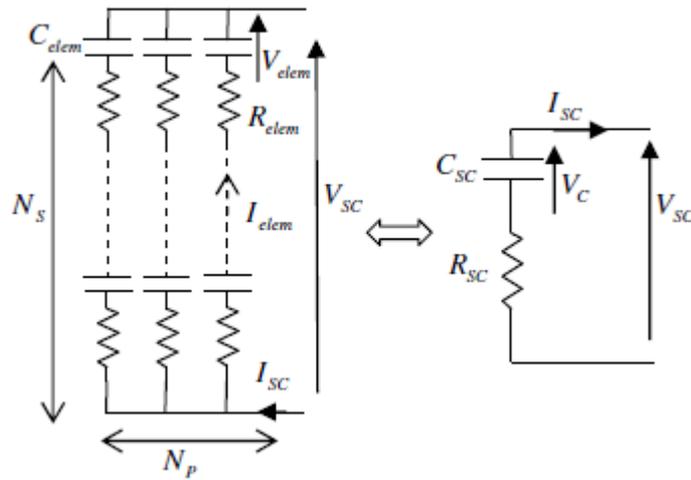


Figure 2.3 : Modèle équivalent d'un stack de supercondensateurs

Les expressions allant de (2.6) à (2.9) relient les grandeurs électriques du stack à celles au niveau du condensateur élémentaire ayant une capacité C_{elem} , une résistance R_{elem} , une tension V_{elem} , et un courant I_{elem} .

$$C_{sc} = \frac{N_p}{N_s} \times C_{elem} \quad (2.6)$$

$$R_{sc} = \frac{N_s}{N_p} \times R_{elem} \quad (2.7)$$

$$V_{sc} = N_s \times V_{elem} \quad (2.8)$$

$$I_{sc} = N_p \times I_{elem} \quad (2.9)$$

L'énergie maximale transférée E_{max_transf} par cet élément de stockage est définie comme la différence entre l'énergie maximale E_{max} et minimale E_{min} . Elle est liée à la tension à vide maximale V_{sc_max} et minimale V_{sc_min} du stack par la relation (2.10).

$$E_{max_transf} = E_{max} - E_{min} = \frac{1}{2} C_{sc} (V_{sc_max}^2 - V_{sc_min}^2) \quad (2.10)$$

Le nombre N_{elem} de supercondensateurs élémentaires nécessaires pour fournir la demande maximale d'énergie est donné par l'équation (2.11).

$$N_{elem} = N_s \times N_p = \frac{2}{1 - D_{sc}^2} \frac{E_{max_transf}}{C_{elem} V_{elem_max}^2} \quad (2.11)$$

D_{sc} désigne la profondeur de décharge définie en tant que rapport entre la tension minimale et maximale d'un élément.

Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome

D'autre part, la puissance du stack exprimée par l'équation (2.12), permet de calculer le courant élémentaire maximal correspondant à cette puissance.

$$P_{sc} = N_{elem} \times (V_{elem} I_{elem} - R_{elem} I_{elem}^2) \quad (2.12)$$

Ayant trouvé le courant élémentaire maximal, nous passerons à calculer le nombre d'éléments supercondensateurs (N_s , N_p) en utilisant les relations (2.13) et (2.14).

$$N_s = \frac{V_{sc_max}}{V_{elem_max}} \quad (2.13)$$

$$N_p = \frac{N_{elem}}{N_s} \quad (2.14)$$

Pour une énergie maximale transférée de 10 kJ et pour une profondeur de décharge de 0,5 [8, 12], le nombre N_{elem} des supercondensateurs élémentaires constituant le stack est égal à 36 éléments.

En utilisant les équations (2.13) et (2.14) pour une tension V_{sc_max} de 32.4V et une cellule élémentaire (100F, 2.7V), les nombres N_s et N_p sont : $N_s = 12$ et $N_p = 3$. Ainsi, le courant maximal que peut fournir ou absorber le stack de supercondensateurs est de 72A.

2.3.6. Dimensionnement des convertisseurs DC-DC

Le dimensionnement des convertisseurs DC-DC connectés aux stacks de piles à combustible, de batteries lithium-ion, et de supercondensateurs consiste à déterminer les valeurs des inductances de lissage L_{fc} , L_{ba} et L_{sc} , et la valeur de la capacité de filtrage C_{dc} du bus continu.

Selon le sens du transfert de l'énergie électrique entre les différents stacks d'une part, et le bus capacitif d'autre part, les deux modes de fonctionnement suivants sont distingués :

a) **Le mode Boost :**

Dans le cas où le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source vers le bus continu et la charge, les différents convertisseurs sont, alors, en mode « Boost » ou élévateur de tension (voir figures 2.4, 2.5 et 2.6) qui permet d'élever les niveaux de tension à leurs entrées à la valeur de la tension du bus continu qui est de 48V.

b) Le mode Buck :

Dans le cas où l'énergie électrique est acheminée vers les batteries lithium-ion et les supercondensateurs afin de les charger, les convertisseurs associées sont, donc, en mode « Buck » ou abaisseur de tension (voir figures 2.5 et 2.6).

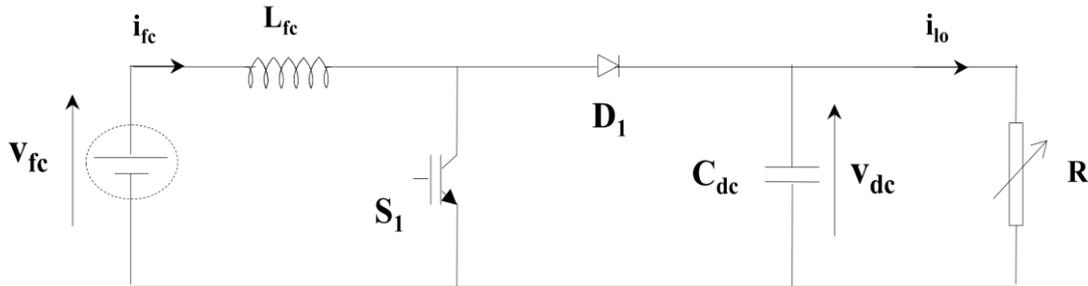


Figure 2.4 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de piles à combustible PEM

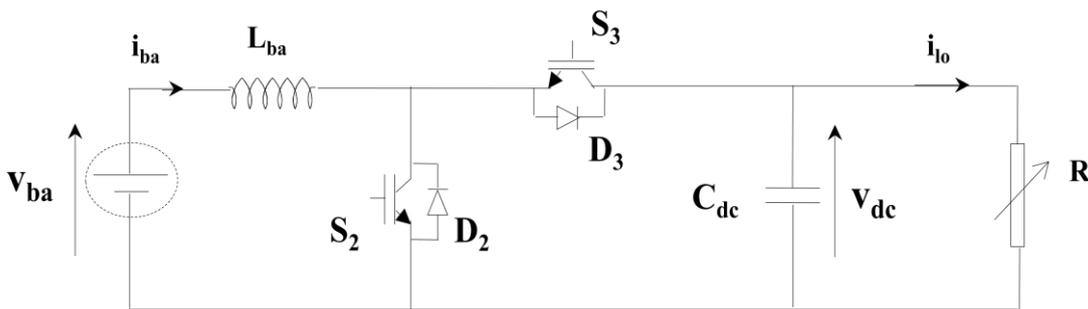


Figure 2.5 : Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC lié au stack de batteries lithium-ion

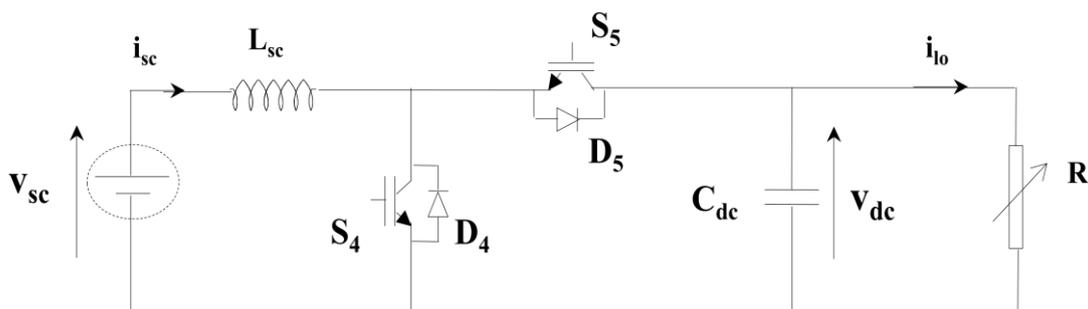


Figure 2.6 : Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC associé au stack de supercondensateurs

Une étude faite par [9, 11-12] a démontré que les expressions des inductances de lissage des convertisseurs Boost et Buck/Boost sont identiques. Ainsi, le calcul des valeurs minimales des composants L_{fc} , L_{ba} et L_{sc} se fait grâce à l'expression (2.15).

$$L_{fc,ba,sc} = \frac{V_{dc}}{4f\Delta I_{\max}(fc,ba,sc)} \quad (2.15)$$

Pour le condensateur de filtrage ayant une capacité C_{dc} (voir figure 2.4), il permet de limiter les ondulations de tension qui résultent du courant alternatif dans le condensateur de sortie [9, 40]. La valeur minimale du condensateur est calculée par la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_{\max}}{4f\Delta V_{dc}} \quad (2.16)$$

Dans ce cas, nous aurons pour : $V_{dc} = 48V$, $f = 2000Hz$, $\Delta I_{\max}(fc,ba,sc) = 2\%I_{\max}(fc,ba,sc)$ et $\Delta V_{dc} = 5\%V_{dc}$, les valeurs suivantes :

- $L_{fc} = 0.024H$
- $L_{ba} = 0.0165H$
- $L_{sc} = 0.0040H$
- $C_{dc} = 0.0036F$

Avec :

V_{dc} : tension moyenne du bus capacitif [V]

f : fréquence de découpage des convertisseurs [Hz]

ΔI_{\max} : ondulation maximale du courant dans l'inductance [A]

I_{\max} : courant dans l'inductance [A]

ΔV_{dc} : ondulation de la tension aux bornes du condensateur de sortie [V]

2.4. Modélisation du système hybride autonome

La modélisation d'un système permet de mieux comprendre son fonctionnement et de bien privilégier le comportement de ses composants pendant la durée de son utilisation, simplifiant ainsi le travail. Dans notre cas, les différents éléments du système hybride autonome étudié ont été modélisés séparément, il s'agit dès lors de les intégrer pour concrétiser le système complet.

2.4.1. Modélisation du comportement du stack de piles à combustible

Lorsqu'un courant électrique circule dans le circuit extérieur d'une cellule PEM, sa tension diminue par rapport à la tension théorique. Ceci est dû aux différentes pertes qui se manifestent en trois types :

- 1) Pertes d'activation, cause de la polarisation d'activation,
- 2) Pertes ohmiques, origine de la polarisation ohmique,
- 3) Pertes de concentration, source de la polarisation de concentration.

Chaque région de polarisation est indiquée dans la figure 2.7.

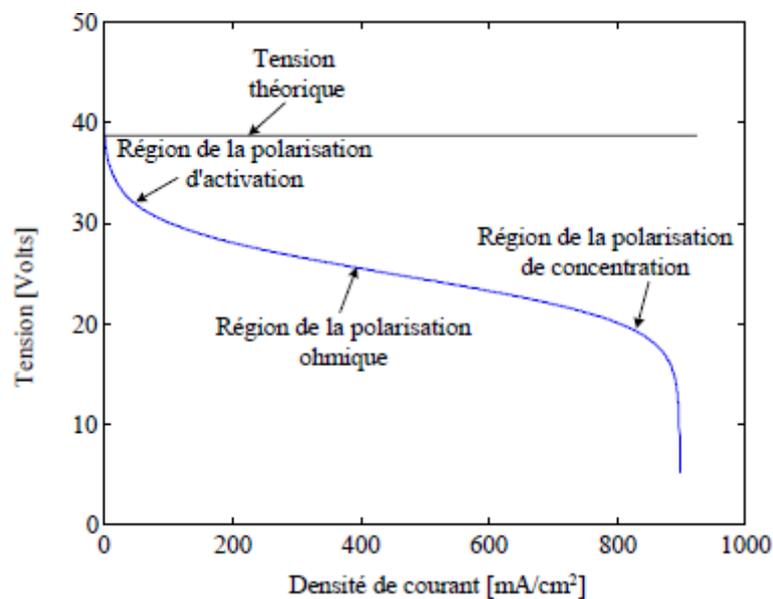


Figure 2.7 : Caractéristique densité de courant-tension d'une pile PEM [41]

2.4.1.1. Pertes d'activation

La chute de tension Δv_{act} due aux pertes d'activation apparaît dans un temps limité. Elle est provoquée par une réaction d'électrode lente, nécessitant une énergie d'activation pour se produire. En effet, pour qu'une réaction chimique ou électrochimique puisse démarrer, les réactifs doivent franchir une barrière d'activation [41].

Dans le cas d'une réaction électrochimique où la chute de tension Δv_{act} est supérieure à 50-100mV [41], Δv_{act} peut être exprimée par l'équation semi-empirique de Tafel [41-42].

$$\Delta v_{act} = A \ln \left(\frac{i_{cell} + i_n}{i_0} \right) \quad (2.17)$$

Avec :

Δv_{act} : chute de tension due aux pertes d'activation [V]

A : pente de la droite de Tafel qui est de l'ordre de 0.06V [7, 11, 43]

i_{cell} : courant délivré par la cellule PEM [mA.cm^{-2}]

i_n : courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte [mA.cm^{-2}]

i_0 : courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte [mA.cm^{-2}]

2.4.1.2. Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues au passage des protons à travers la résistance de la membrane, et à la circulation des électrons dans la résistance interne des électrodes. La chute de tension Δv_{ohm} résultante dépend linéairement du courant débité et peut être transcrite comme suit [11] :

$$\Delta v_{ohm} = (R_{mem} + R_{ele}) i_{cell} \quad (2.18)$$

Avec :

Δv_{ohm} : chute de tension due aux pertes ohmiques [V]

R_{mem} : résistance de la membrane [$\text{k}\Omega.\text{cm}^2$]

R_{ele} : résistance interne des électrodes [$\text{k}\Omega.\text{cm}^2$]

i_{cell} : courant débité par la cellule PEM [mA.cm^{-2}]

2.4.1.3. Pertes de concentration

La chute de tension Δv_{con} causée par les pertes de concentration est plus significative pour les intensités de courant importants. Lorsque la demande en courant accroît, le maintien nécessaire de la concentration des réactifs devient difficile conduisant, ainsi, à un effondrement rapide de la tension aux bornes de la cellule.

La chute Δv_{con} est exprimée par la relation empirique suivante :

$$\Delta v_{con} = -m \exp(n i_{cell}) \quad (2.19)$$

Avec :

Δv_{con} : chute de tension due aux pertes de concentration [V]

m : constante de l'ordre de 3.10^{-5} [V]

Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome

n : constante de l'ordre de 8.10^{-3} [$\text{mA}^{-1}.\text{cm}^2$]
 i_{cell} : demande en courant [$\text{mA}.\text{cm}^{-2}$]

2.4.1.4. Expression de la tension aux bornes du stack en fonction du courant débité

Pour caractériser le fonctionnement du stack à piles à combustible PEM, on s'est limité, dans ce travail, à une approche simple où les différents phénomènes sont rassemblés.

En regroupant toutes les chutes de tension causées par les différentes pertes, la tension aux bornes d'une cellule PEM peut être exprimée par (2.20).

$$v_{\text{cell}} = E - ri_{\text{cell}} - A \ln\left(\frac{i_{\text{cell}} + i_n}{i_0}\right) - m \exp(ni_{\text{cell}}) \quad (2.20)$$

E représente la tension théorique à vide (de l'ordre de 1.2V), et r est la résistance spécifique totale.

Comme indiqué dans le paragraphe 2.4.1.3, l'effondrement rapide de la tension v_{cell} aux bornes de la cellule PEM ne se produit que lorsque la demande en courant dépasse une certaine valeur. Pour cause, ce phénomène ne va pas être pris en considération.

Par conséquent, la tension v_{cell} aux bornes d'une cellule PEM est écrite comme suit :

$$v_{\text{cell}} = E - R_{\text{cell}}i_{\text{cell}} - A \ln(ai_{\text{cell}} + b) \quad (2.21)$$

Dans [11], les constantes R_{cell} , a et b sont identifiées par application de différents échelons de courant à l'entrée de la cellule. Les valeurs de R_{cell} , a et b sont indiquées dans le tableau 2.2.

Constante	Valeur
R_{cell} [Ω]	0.002
a [A^{-1}]	21.273
b	96.297

Tableau 2.2 : Paramètres de la cellule PEM utilisée dans [11]

Enfin, l'expression de la tension aux bornes du stack en fonction du courant débité est donnée par :

$$v_{\text{fc}} = 40(E - R_{\text{cell}}i_{\text{fc}} - A \ln(ai_{\text{fc}} + b)) \quad (2.22)$$

Le tracé de la fonction $v_{fc} = f(i_{fc})$ est présenté sur la figure ci-dessous.

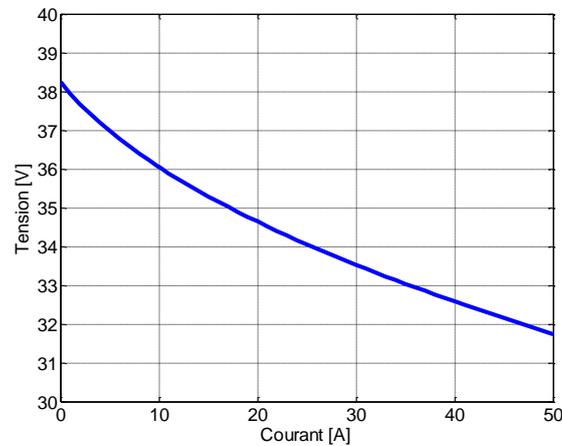


Figure 2.8 : Caractéristique $v_{fc} = f(i_{fc})$ du stack de piles à combustible

2.4.2. Modélisation du comportement du stack de batteries lithium-ion

Plusieurs modèles de batteries au lithium-ion existent. Cependant, leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres (température, etc.). Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, ces batteries réagissent différemment. Donc, on ne trouve pas un modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Pour cette raison, nous avons choisi un circuit R-C série propre au modèle d'une batterie lithium-ion.

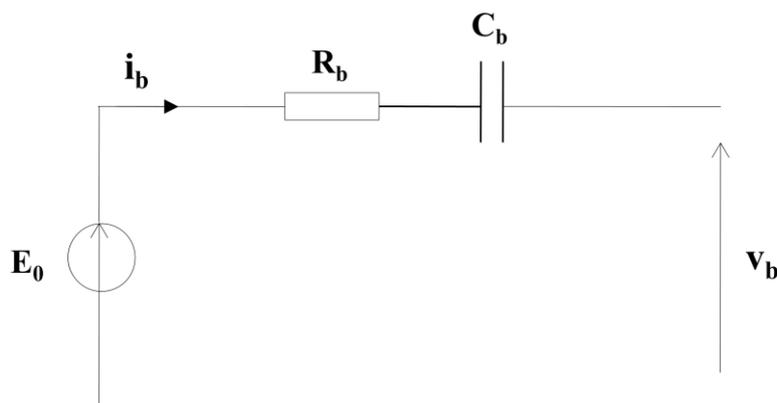


Figure 2.9 : Modèle R-C série d'une batterie lithium-ion

D'après la loi des mailles, la tension aux bornes d'une batterie (en régime de décharge) peut être présentée par l'équation suivante :

$$v_b = E_0 - R_b i_b - \frac{1}{C_b} \int i_b dt \quad (2.23)$$

Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome

Avec :

v_b : tension de la batterie lithium-ion [V]

E_0 : sa tension à vide [V]

i_b : son courant [A]

R_b : sa résistance [Ω]

C_b : sa capacité [F]

Pour un stack composé de N_{bas} batteries en série, et N_{bap} en parallèle, on peut écrire :

$$E_{ba0} = N_{bas} E_0 \quad (2.24)$$

$$R_{ba} = \frac{N_{bas}}{N_{bap}} R_b \quad (2.25)$$

$$C_{ba} = \frac{N_{bap}}{N_{bas}} C_b \quad (2.26)$$

$$v_{ba} = E_{ba0} - R_{ba} i_b - \frac{1}{C_{ba}} \int i_b dt \quad (2.27)$$

Nous définissons l'état de charge, EDC_{ba} , du stack comme étant le rapport entre sa capacité nominale C_{ban} et la quantité de charge Q_{mba} manquante par rapport à C_{ban} .

$$EDC_{ba} = \left(1 - \frac{Q_{mba}}{C_{ban}} \right) \times 100\% \quad (2.28)$$

Afin d'analyser les réponses en tension et en état de charge du stack, nous avons effectué une charge/décharge à un courant constant de 18.2A. Les résultats obtenus sont exposés sur la figure 2.10.

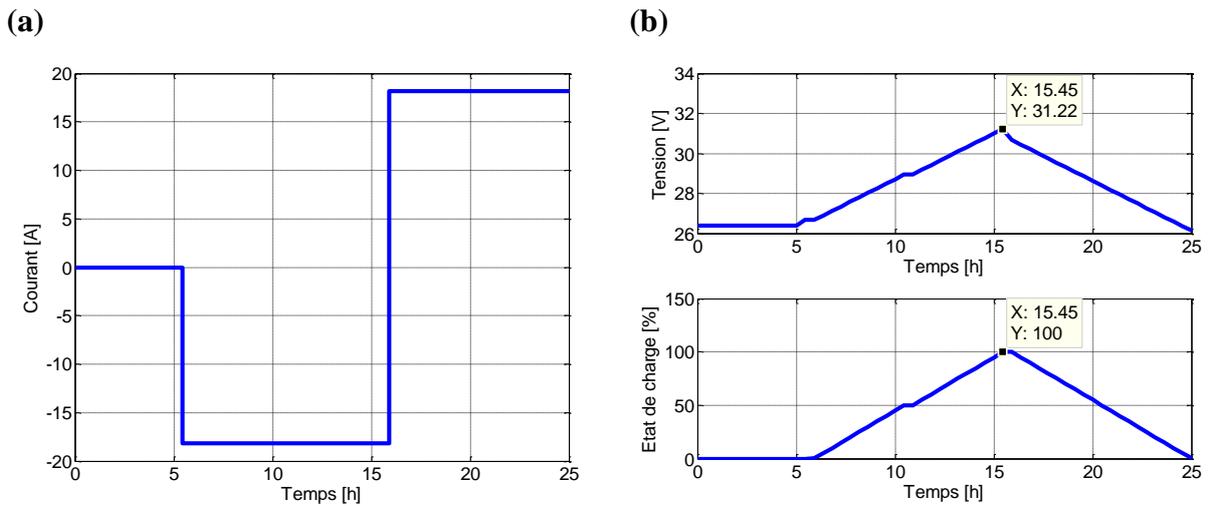


Figure 2.10 : (a) : Courant constant de charge/décharge de 18.2A ;
(b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de batteries

En rappelant que la capacité C_{10} est la capacité en « ampère-heure » du stack en régime de charge/décharge à courant constant durant 10 heures [28], la figure 2.10 indique que les évolutions de la tension v_{ba} et de l'état de charge EDC_{ba} sont monotones durant les périodes de charge/décharge. En fin de charge, le stack arrive à une tension d'environ 31V (pour un EDC_{ba} de 100%) ; d'où l'expression qu'il est : « complètement chargé ».

2.4.3. Modélisation du comportement du stack de supercondensateurs

L'utilisation des supercondensateurs en tant que moyen de stockage passe par la réalisation d'un stack en associant plusieurs éléments en série et en parallèle.

Le modèle équivalent d'un élément supercondensateur comprend un condensateur $C_{\text{élé}}m$ en série avec une résistance $R_{\text{élé}}m$ [9]. Ces deux paramètres décrivent les pertes ohmiques de la composante résistive, et le comportement de l'élément pendant la charge et décharge [44-45].

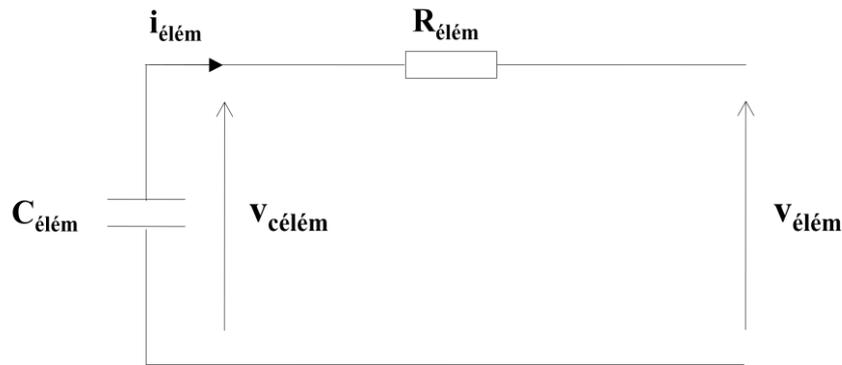


Figure 2.11 : Modèle d'un élément supercondensateur

En considérant que le courant $i_{\text{élément}}$ d'un élément supercondensateur est positif pendant la phase de décharge et négatif pendant la phase de charge, la tension aux bornes d'un élément peut être écrite comme suit :

$$V_{\text{élément}} = V_{c_{\text{élément}}} - R_{\text{élément}} i_{\text{élément}} \quad (2.29)$$

Un supercondensateur unitaire présente une tension de l'ordre de 2,5 à 2,7 V, ce qui fait que plusieurs éléments doivent être mis en série afin d'obtenir la tension demandée. Il est évident que mettre en série les condensateurs diminue leur capacité équivalente pour obtenir une capacité élevée à une tension demandée, un arrangement en série et en parallèle de plusieurs supercondensateurs est envisagé formant un module complet ou un stack comme définit dans le paragraphe 2.3.5. La tension aux bornes d'un stack de supercondensateurs est déterminée par la relation (2.30).

$$V_{sc} = V_{c_{sc}} - R_{sc} i_{sc} \quad (2.30)$$

Avec :

EDC_{sc} : état de charge du stack [%]

E_{sc} : énergie contenue dans le stack [J]

E_{scmax} : énergie maximale contenue dans le stack [J]

Pour observer les tracés de la tension aux bornes du stack ainsi que son état de charge, un passage en créneau d'un courant de décharge de 0 à 50A est effectué. Comme on peut le constater, la figure 2.12 démontre que la tension aux bornes du stack comprend deux termes :

une composante résistive liée à la résistance série, et autre capacitive représentant l'évolution de l'énergie stockée dans le stack.

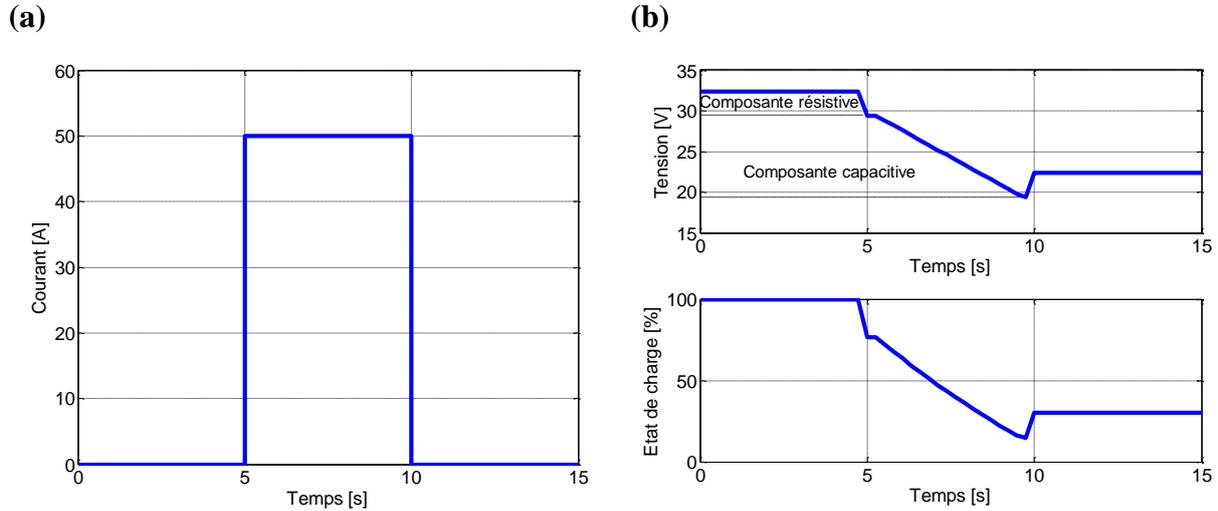


Figure 2.12 : (a) : Courant de décharge variant de 0 à 50A ;

(b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de supercondensateurs

2.4.4. Modélisation du fonctionnement des convertisseurs statiques

La connexion des sources d'énergie (stack de piles à combustible, de batteries, et de supercondensateurs) sur le bus continu doit se faire par l'intermédiaire de trois convertisseurs statiques. Pour le stack de piles à combustible, il s'agit d'un CVS Boost permettant d'élever la tension du stack qui est très souvent inférieure à celle du bus continu. En ce qui concerne les éléments de stockage, la connexion doit se faire par l'intermédiaire de deux convertisseurs statiques réversibles en courant (un CVS pour chaque élément), car les stacks de batteries et de supercondensateurs peuvent être chargés ou déchargés.

La modélisation des convertisseurs passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement selon l'état des interrupteurs considérés parfaits [9]. Soient u_1 , u_2 , u_3 , u_4 et u_5 les signaux de commandes des transistors S_1 , S_2 , S_3 , S_4 et S_5 (voir figure 2.1).

La mise en équation des trois convertisseurs statiques commandés en courant fait apparaître quatre types de fonctionnement.

**Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible
totalement autonome**

1) Type 1 :

Source d'énergie	FCs	BATs	SCs
Convertisseur associé	Boost	Boost	Boost

Tableau 2.3 : Premier type de fonctionnement des convertisseurs DC-DC

Quand tous les convertisseurs fonctionnent en mode « Boost », leur comportement est décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{L_{fc}}(v_{fc} - (1-u_1)v_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{L_{ba}}(v_{ba} - (1-u_2)v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}}(v_{sc} - (1-u_4)v_{dc}) \end{cases} \quad (2.31)$$

2) Type 2 :

Source d'énergie	FCs	BATs	SCs
Convertisseur associé	Boost	Boost	Buck

Tableau 2.4 : Deuxième type de fonctionnement des convertisseurs DC-DC

Si le convertisseur connecté au stack de supercondensateurs fonctionne en mode « Buck » (le stack reçoit de l'énergie qui provient du bus continu), le système d'équations (2.32) décrit le comportement des trois convertisseurs.

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{L_{fc}}(v_{fc} - (1-u_1)v_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{L_{ba}}(v_{ba} - (1-u_2)v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}}(v_{sc} - u_5v_{dc}) \end{cases} \quad (2.32)$$

3) Type 3 :

Source d'énergie	FCs	BATs	SCs
Convertisseur associé	Boost	Buck	Boost

Tableau 2.5 : Troisième type de fonctionnement des convertisseurs DC-DC

Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome

Dans le cas où le convertisseur lié au stack de batteries fonctionne en mode « Buck » (le stack reçoit de l'énergie qui provient des piles à combustible), le comportement des trois convertisseurs peut être représenté par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{L_{fc}}(v_{fc} - (1-u_1)v_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{L_{ba}}(v_{ba} - u_3v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}}(v_{sc} - (1-u_4)v_{dc}) \end{cases} \quad (2.33)$$

4) Type 4 :

Source d'énergie	FCs	BATs	SCs
Convertisseur associé	Boost	Buck	Buck

Tableau 2.6 : Quatrième type de fonctionnement des convertisseurs DC-DC

Lorsque les convertisseurs associés aux éléments de stockage fonctionnent en mode « Buck », le système d'équations (2.34) décrit le comportement des trois convertisseurs.

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{L_{fc}}(v_{fc} - (1-u_1)v_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{L_{ba}}(v_{ba} - u_3v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}}(v_{sc} - u_5v_{dc}) \end{cases} \quad (2.34)$$

2.5. Conclusion

Ce chapitre a été scindé en deux parties essentielles : dimensionnement et modélisation.

Dans la première partie, le dimensionnement des sources d'énergie d'un système hybride alimentant un habitat énergétiquement autonome a été présenté. Les sources concernées, en plus des convertisseurs DC-DC associés, sont :

- * Un stack de piles à combustible PEM,
- * Un stack de batteries lithium-ion,
- * Un stack de supercondensateurs.

Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation d'un système hybride piles à combustible totalement autonome

Pour la deuxième partie, la modélisation des différentes sources a été traitée en utilisant un circuit équivalent représentant chaque élément.

Après avoir obtenu les caractéristiques et principes de fonctionnement des éléments du système hybride totalement autonome, nous passerons dans le chapitre suivant à :

- 1) La gestion optimale des flux énergétiques entre les différentes sources d'une part, et la charge d'autre part,
- 2) La régulation de la tension du bus capacitif intermédiaire entre les sources d'énergie et la charge.

Chapitre 3 :

Commande optimale/plate du système
hybride piles à combustible totalement
autonome

3.1. Introduction

Ce chapitre va traiter une commande optimale sous contraintes basée sur le principe du maximum de Pontriaguine fondé sur l'équation d'Euler-Lagrange. Elle sera utilisée afin de gérer d'une manière optimale les flots d'énergie dans un système à base de piles à combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), associées aux batteries lithium-ion et des supercondensateurs à travers un bus continu de tension à réguler par usage de la commande par platitude différentielle.

L'adaptation des niveaux de tension entre les différentes sources et la charge sera assurée par l'utilisation de trois convertisseurs DC-DC, l'un Boost connecté aux piles à combustible, les autres de type Buck/Boost connectés aux batteries lithium-ion et supercondensateurs, permettant le maintien constant de la tension aux bornes du bus continu, et d'imposer la puissance sollicitée par l'habitat selon un profil de consommation journalier proposé.

3.2. Stratégies de commande optées

L'objectif de tout système d'énergie électrique est de satisfaire la puissance demandée par la charge. Dans le cas d'un système à base de piles à combustible, cet objectif est soumis à plusieurs contraintes : il s'agit de minimiser la consommation d'hydrogène en réalisant une répartition optimale de puissance entre les diverses sources avec prise en compte des contraintes énergétiques que peuvent subir les différents organes, telles que la puissance limitée des piles, l'état de charge des éléments de stockage, etc.

3.2.1. Commande optimale

La théorie du contrôle a pour rôle l'analyse des propriétés d'un système dynamique sur lesquels il est possible d'agir au moyen d'une loi de commande. Le but est d'amener le système d'un état initial donné à un certain état final désiré et de déterminer des solutions optimales sous un certain critère d'optimisation, tout en respectant des contraintes.

La théorie moderne du contrôle optimal a débuté dans les années 50, avec la formulation du principe du maximum de Pontriaguine (formulation prenant le nom du mathématicien russe : Lev Semionovitch Pontriaguine) qui généralise les équations d'Euler-Lagrange du calcul des variations [46-48].

Parmi les méthodes d'optimisation présentées dans la littérature, nous trouvons celles disposant d'une connaissance à l'avance du profil de consommation dont l'utilisation des algorithmes d'optimisation globale est envisageable. Elles permettent de calculer à chaque instant, la meilleure répartition de puissance entre les sources d'énergie d'un système hybride.

Le problème d'optimisation globale peut être résolu, soit par utilisation de la programmation dynamique, ou par la commande optimale qui s'applique lorsqu'il est possible de faire évaluer la variation du critère en fonction de celle de la commande [46]. Ces deux méthodes sont basées, respectivement, sur l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman et le principe du maximum de Pontriaguine [11, 46-48].

De [11, 49], nous pouvons conclure quelques avantages à l'application de la commande optimale par rapport à la programmation dynamique :

- Elle constitue une technique efficace pour la gestion de l'énergie,
- En plus qu'elle est en fonction du temps, la solution peut être mise sous forme d'une commande en fonction de l'état,
- Grande facilité de mise en œuvre,
- Elle présente l'avantage d'un calcul relativement rapide et d'un faible encombrement de mémoire.

3.2.1.1. Principe fondée sur la technique d'Euler-Lagrange

On définit l'Hamiltonien d'un système comme suit :

$$H(t, x, u) = l(t, x, u) + \lambda f(t, x, u) \quad (3.1)$$

x et u désignent les vecteurs des variables d'état et de contrôle du système.

λ est appelé : état adjoint ou multiplicateur de Lagrange.

Le principe du maximum de Pontriaguine énonce que la trajectoire optimale vérifie certaines équations appelées « canoniques d'Hamilton » qui respectent les conditions sur les dynamiques de l'état et l'état adjoint du système donnés par :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x, u) \\ H(t, x, u) &= l(t, x, u) + \lambda f(t, x, u) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Une condition sur la valeur finale de l'état adjoint apparait lorsque l'état final est libre. Elle est donnée par la relation (3.3).

$$\lambda(t_f) = \frac{\partial d_f(t_f, x(t_f))}{\partial x(t_f)} \quad (3.3)$$

Si aucune contrainte (de type saturation) n'est imposée sur la commande $u(t)$, la condition de transversalité donnée par l'équation ci-après permet d'exprimer $u(t)$ en fonction de l'état et l'état adjoint.

$$\frac{\partial H(t, x, u)}{\partial u} = 0 \quad (3.4)$$

3.2.1.2. Principe basé sur l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman

En plus du principe de maximum de Pontriaguine, la théorie de la commande optimale est basée sur la formulation de la programmation dynamique découverte par le mathématicien américain : Richard Ernest Bellman.

Le principe d'optimalité de Bellman s'énonce comme suit : « Une stratégie optimale possède la propriété que, quelque soient l'état et instant initiaux, les décisions restant à prendre (c'est-à-dire les décisions à prendre à partir de cet état initial et de cet instant initial) doivent aussi constituer une stratégie optimale » [11, 49].

Il découle de ce principe d'optimalité l'équation de la programmation dynamique définie par (3.5) à partir de la notion de fonction de Bellman [11, 49-50] :

$$V(t, x) = \min_{u(s), t \leq s \leq t_f} \int_t^{t_f} l(s, x(s), u(s)) ds + q_f(t_f, x(t_f)) \quad (3.5)$$

Avec la condition au temps final :

$$V(t_f, x(t_f)) = q_f(t_f, x(t_f)) \quad (3.6)$$

x et u représentent les vecteurs des variables d'état et de contrôle du système.

❖ Le principe d'optimalité permet d'écrire :

$$V(t, x) = \left(\min_{u(s), t \leq s \leq t+dt} \int_t^{t+dt} l(s, x(s), u(s)) ds \right) + \left(\min_{u(s), t+dt \leq s \leq t_f} \int_{t+dt}^{t_f} l(s, x(s), u(s)) ds \right) + q_f(t_f, x(t_f)) \quad (3.7)$$

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

Alors :

$$V(t, x) = \left(\min_{u(s), t \leq s \leq t+dt} \int_t^{t+dt} l(s, x(s), u(s)) ds \right) + V(t + dt, x(t + dt)) \quad (3.8)$$

- ❖ Un développement au premier ordre de l'équation (3.8) donne les deux approximations suivantes :

$$\int_t^{t+dt} l(s, x(s), u(s)) ds = l(t, x(t), u(t)) dt \quad (3.9)$$

$$V(t + dt, x(t + dt)) = V(t, x(t)) + \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} dt + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} F(t, x, u) dt \quad (3.10)$$

- ❖ En remplaçant ces deux approximations dans l'équation (3.8), nous obtenons :

$$V(t, x) = \min_{u(t)} (l(t, x(t), u(t)) dt) + V(t, x(t)) + \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} dt + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} F(t, x, u) dt \quad (3.11)$$

- ❖ En considérant que la limite de $V(t, x) \rightarrow 0$ lorsque $dt \rightarrow 0$ [11], l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman est mise sous la forme suivante :

$$-\frac{\partial V(t, x)}{\partial t} = \min_{u(t)} (l(t, x(t), u(t))) + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} F(t, x, u) \quad (3.12)$$

- ❖ Pour un problème affine-quadratique en u , nous posons :

$$\dot{x} = F(t, x, u) = f(t, x) + g(t, x)u \quad (3.13)$$

$$l(t, x, u) = L(t, x) + u^T R(t, x)u \quad (3.14)$$

Avec : $u^T = u$

- ❖ Afin d'obtenir la commande u_{ref} , l'opérateur gradient est introduit. Nous pouvons ainsi conclure :

$$\nabla_u \left[(l(t, x(t), u(t))) + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} F(t, x, u) \right] = 0 \quad (3.15)$$

- ❖ Par conséquent, la commande u_{ref} est donnée par :

$$u_{ref}(t, x) = -\frac{1}{2R(t, x)^{-1}} g(t, x)^T + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x}^T \quad (3.16)$$

Où : $R^T = R$ et $g^T = g$

❖ Finalement, l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman est donnée par :

$$-\frac{\partial V(t, x)}{\partial t} = L(t, x) - \frac{1}{4} \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} g(t, x) R(t, x)^{-1} g(t, x)^T \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} f(t, x) \quad (3.17)$$

Avec la condition au temps final :

$$V(t_f, x(t_f)) = q_f(t_f, x(t_f)) \quad (3.18)$$

Et :

$$\frac{\partial V(t, x)^T}{\partial x} = \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \quad (3.19)$$

3.2.2. Commande par platitude

Les travaux précédents ont démontré l'intérêt des stratégies de contrôle utilisant le concept de platitude des systèmes différentiels. Cette propriété permet de caractériser la trajectoire d'état d'un système non linéaire via l'utilisation des sorties plates et leurs dérivées successives.

De [7, 12, 35-37, 51-59], nous pouvons citer quelques avantages à l'application du concept de la platitude pour des systèmes différentiels de puissance :

- Il permet une prédiction relativement bonne de l'évolution des variables d'état du système,
- Les variables d'état et de contrôle du système sont carrément estimées par les trajectoires des sorties plates et leurs dérivées successives sans avoir besoin à intégrer aucune équation différentielle,
- L'utilisation des références au lieu des mesures dans les lois de commande permet de réduire l'impact nuisible du bruit,
- Le contrôle des systèmes différentiellement plats se base sur la génération de trajectoires faisables, c'est-à-dire que les changements demandés à l'état du système respectent ses contraintes physiques (saturation des tensions de commande, rapports cycliques, valeurs maximales des courants, etc.). Cette propriété n'est pas toujours assurée en régime transitoire avec beaucoup de contrôles linéaires ou non linéaires qui se contentent de

Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome

forcer la trajectoire d'état à converger vers un point de fonctionnement donné (PI, commande par mode de glissement, etc.),

- Il permet un bon contrôle du système, même pendant le régime transitoire,
- Pour les systèmes différentiellement plats, l'application des techniques de linéarisation entrée/sortie ne conduit pas à l'apparition des zéros dynamiques instables,
- L'utilisation des trajectoires de référence permet d'assurer un fonctionnement sain des convertisseurs de puissance, surtout durant les phases de démarrage et pendant les régimes transitoires.

→ **Platitude des systèmes différentiels :**

La propriété de la platitude différentielle d'un système est une notion qui a été proposée et développée par M. Fliess et al. [60-61].

Un système d'équations différentielles ordinaires est dit « différentiellement plat », s'il existe des variables x , u et y tels que :

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.20)$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (3.21)$$

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \quad (3.22)$$

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T \quad (3.23)$$

x est le vecteur des variables d'état, u est celui de contrôle, y étant des sorties plates, et $(n, m) \in \mathbb{N}$.

a) Le vecteur y peut s'écrire en fonction de x et u comme suit :

$$y = f(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(s)}) \quad (3.24)$$

Les vecteurs x et u peuvent être exprimés en fonction du vecteur des sorties plates y et un nombre fini de ses dérivées comme suit :

$$\begin{cases} x = \varphi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r)}) \\ u = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r+1)}) \end{cases} \quad (3.25)$$

Alors, un système est dit : « différentiellement plat » si : si : la variable de contrôle x dépend d'un nombre (r) de dérivées successives de la sortie plate y , alors : la variable de contrôle u sera en fonction d'un nombre ($r+1$) de ces dérivées.

b) Il n'existe pas d'équation différentielle sous la forme :

$$0 = \zeta(y, \dot{y}, \dots, y^{(k)}) \quad (3.26)$$

Le vecteur u de control exprimé dans (3.25) peut être obtenu sans avoir besoin à intégrer aucune équation différentielle [62-68]. Il est alors possible d'obtenir l'évolution de tous les variables d'état du système [7, 12, 35-37, 51-58, 69].

L'étude de la platitude d'un système de puissance passe par les trois étapes suivantes [69] :

- La vérification de l'appartenance du système à la classe des systèmes différentiellement plats ; c'est-à-dire : vérifier les conditions de platitude exprimées dans (3.24) et (3.25),
- La planification des trajectoires de référence dédiées aux sorties plates,
- La synthèse des lois de commande permettant la régulation des sorties plates à leurs trajectoires de référence.

3.3. Vérification de la commande hybride optimale/plate proposée

Le problème de la gestion énergétique des systèmes hybrides consiste essentiellement à développer des algorithmes ou stratégies de commande, dont le rôle est de trouver à chaque instant la meilleure répartition de puissance entre les différentes sources d'énergie.

3.3.1. Description et modélisation du système hybride autonome

Pour connecter une source principale et deux dispositifs de stockage sur un bus continu, plusieurs structures sont envisagées. Cependant, la masse totale, le volume, le coût et l'efficacité du système sont des contraintes à prendre en considération.

Comme cité dans [70], la structure répondant à toutes ces contraintes, et retenue pour ce travail est celle représentée sur la figure 3.1. Cette architecture présente les avantages d'une énergie spécifique très élevée, d'une puissance importante durant des périodes très brèves, et elle se compose de :

- Un bus continu basse tension v_{dc} de 48V [70], et de nature capacitive (C_{dc}),

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

- Piles à combustible de type PEM, considérées comme source principale d'énergie, de tension v_{fc} , fournissant une puissance P_{fc} , et connectées au bus continu à travers un convertisseur DC-DC (Boost) de structure non isolée,
- Un organe de stockage représenté par des batteries lithium-ion utilisées en tant que source secondaire d'énergie, de tension v_{ba} , de puissance P_{ba} . Il est relié au bus continu à travers un convertisseur DC-DC bidirectionnel en courant (Buck/Boost) de structure non isolée,
- Supercondensateurs considérés comme source de puissance, de tension v_{sc} , fournissant et absorbant une puissance P_{sc} . Ils sont connectés au bus continu à travers un convertisseur DC-DC bidirectionnel en courant (Buck/Boost) de structure non isolée,
- Une charge résistive variable (R) modélisant l'ensemble « onduleur + charges alternatives ».

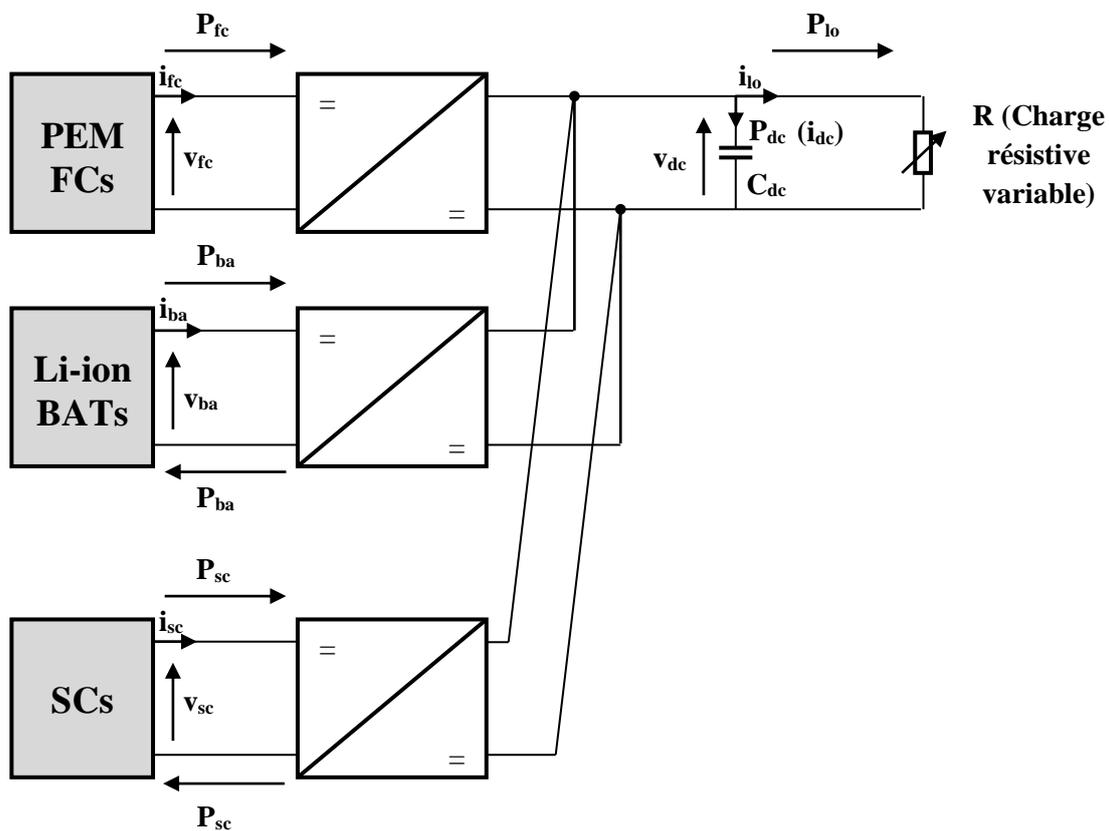


Figure 3.1 : Structure du système hybride autonome

L'objectif d'optimisation de la gestion de l'énergie de la source hybride « piles à combustible, batteries et supercondensateurs » est de minimiser la puissance électrique P_{fc} fournie par les piles à la charge durant la période de fonctionnement. Cette puissance doit être

limitée. Ainsi, les batteries fournissent la différence de puissance entre les piles et la charge, satisfaisant l'équation suivante :

$$P_{fc}(t) + P_{ba}(t) = P_{Io}(t) \quad (3.27)$$

Le rôle des supercondensateurs dans le système multi-sources étudié est de fournir ou absorber une puissance P_{sc} permettant de garantir des échanges de puissance entre les différentes sources à travers un bus continu de tension stabilisée à sa valeur de référence.

En résumé, la stratégie adoptée pour la gestion de l'énergie doit satisfaire à tout moment la relation :

$$P_{fc}(t) + P_{ba}(t) + P_{sc}(t) = P_{Io}(t) + P_{dc}(t) \quad (3.28)$$

3.3.2. Application de la commande optimale

Dans cette partie, la commande optimale basée sur les techniques d'Euler-Lagrange et d'Hamilton-Jacobi-Bellman sera appliquée sur le système hybride piles à combustible retenu.

3.3.2.1. Principe fondée sur la technique d'Euler-Lagrange

Dans cette partie, l'objectif est de résoudre le problème de l'optimisation de la gestion de l'énergie électrique dans un système hybride à piles à combustible par utilisation de la commande optimale sous contraintes fondée sur le principe de la méthode du maximum de Pontriaguine basé sur l'équation d'Euler-Lagrange.

➤ Posons :

$$x(t) = Q_{ba}(t) \quad (3.29)$$

$$\dot{x}(t) = -i_{ba}(t) \quad (3.30)$$

$$x_{ref} = Q_{baref} \quad (3.31)$$

$$u(t) = i_{ba}(t) \quad (3.32)$$

$$l(t, x, u) = P_{Io}(t) - P_{ba}(t) \quad (3.33)$$

$$d_f(t_f, x(t_f)) = (x(t_f) - x_{ref})^2 \quad (3.34)$$

$$f(t, x, u) = -u(t) \quad (3.35)$$

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

Pour : $P_{ba}(t) = \frac{1}{C_{ba}} Q_{ba}(t) i_{ba}(t) - R_{ba} i_{ba}(t)^2$, l'Hamiltonien du système peut être exprimé

comme suit :

$$H(t, x, u) = P_{I_0}(t) - \frac{1}{C_{ba}} x(t)u(t) + R_{ba} u(t)^2 - \lambda u(t) \quad (3.36)$$

$$D'où : H(t, Q_{ba}(t), i_{ba}(t)) = P_{I_0}(t) - \frac{1}{C_{ba}} Q_{ba}(t) i_{ba}(t) + R_{ba} i_{ba}(t)^2 - \lambda i_{ba}(t) \quad (3.37)$$

❖ L'étape suivante consiste à résoudre les quatre équations suivantes :

$$\dot{x}(t) = -u(t) \quad (3.38)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{1}{C_{ba}} u(t) \quad (3.39)$$

$$\lambda(t_f) = 2(x(t_f) - x_{ref}) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0 \quad (3.41)$$

(3.41) →

$$-\frac{1}{C_{ba}} x(t) + 2R_{ba} u(t) - \lambda(t) = 0 \quad (3.42)$$

❖ En effectuant une deuxième dérivation des termes de l'équation (3.42), nous obtenons :

$$-\frac{1}{C_{ba}} \dot{x}(t) + 2R_{ba} \dot{u}(t) - \dot{\lambda}(t) = 0 \quad (3.43)$$

❖ En combinant les relations (3.38), (3.39) et (3.43), nous trouvons que :

$$2R_{ba} \dot{u}(t) = 0 \Rightarrow u(t) = K_c \quad (3.44)$$

(3.38) →

$$\dot{x}(t) = -K_c \quad (3.45)$$

❖ La résolution de cette dernière équation différentielle donne :

$$x(t) = -K_c(t - t_0) + x(t_0) \text{ Avec : } x(t_0) = Q_{ba}(t_0) = 0 \quad (3.46)$$

❖ En combinant les équations (3.42), (3.44) et (3.46), l'état adjoint peut être écrit comme suit :

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

$$\lambda(t) = \frac{K_c}{C_{ba}}(t - t_0) - \frac{1}{C_{ba}}x(t_0) + 2R_{ba}K_c \quad (3.47)$$

❖ Pour $t = t_f$:

$$\lambda(t_f) = \frac{K_c}{C_{ba}}(t_f - t_0) - \frac{1}{C_{ba}}x(t_0) + 2R_{ba}K_c = 2(x(t_f) - x_{ref}) \quad (3.48)$$

$$x(t_f) = -K_c(t_f - t_0) + x(t_0) \quad (3.49)$$

❖ Par la suite, en arrangeant les équations (3.48) et (3.49), la valeur de la constante K_c est déterminée par :

$$K_c = \frac{-2C_{ba}x_{ref} + x(t_0)(1 + 2C_{ba})}{2R_{ba}C_{ba} + (1 + 2C_{ba})(t_f - t_0)} \quad (3.50)$$

❖ Enfin, la trajectoire du courant de référence i_{baref} des batteries est exprimée par :

$$i_{baref}(t) = \frac{-2C_{ba}Q_{baref} + Q_{ba}(t_0)(1 + 2C_{ba})}{2R_{ba}C_{ba} + (1 + 2C_{ba})(t_f - t_0)} \quad (3.51)$$

❖ Les expressions des puissances de référence P_{baref} et P_{fcref} sont exprimées de la manière suivante :

$$P_{baref}(t) = \frac{1}{C_{ba}}Q_{ba}(t)i_{ba}(t) - R_{ba}(t)i_{ba}(t)^2 \quad (3.52)$$

$$P_{fcref}(t) = P_{lo}(t) - P_{baref}(t) \quad (3.53)$$

❖ Dans la pratique, la puissance des piles à combustible est limitée. Pour prendre cette contrainte en considération, P_{fcref} doit être limitée aux données ci-après :

$$P_{fc \min} \leq P_{fcref} \leq P_{fc \max} \quad (3.54)$$

$$P_{fc \min} \leq P_{lo}(t) - \frac{1}{C_{ba}}Q_{ba}(t)i_{ba}(t) + R_{ba}(t)i_{ba}(t)^2 \leq P_{fc \max} \quad (3.55)$$

❖ En fonction du courant i_{baref} , trois cas apparaissent :

a) **Premier cas** : le courant i_{baref} vérifie la relation (3.55). Alors :

$$i_{baref}(t) = \frac{-2C_{ba}Q_{baref} + Q_{ba}(t_0)(1 + 2C_{ba})}{2R_{ba}C_{ba} + (1 + 2C_{ba})(t_f - t_0)} \quad (3.56)$$

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

b) Deuxième cas : $P_{fc\text{ref}} > P_{fc\text{max}}$, la puissance $P_{fc\text{ref}}$ est fixée à $P_{fc\text{max}}$ et le nouveau courant i_{bareff} est déduit en remplaçant (3.52) dans (3.53). Donc :

$$i_{\text{bareff}}(t) = \frac{\frac{Q_{ba}(t)}{C_{ba}} - \sqrt{\left(\frac{Q_{ba}(t)}{C_{ba}}\right)^2 - 4R_{ba}(P_{lo}(t) - P_{fc\text{max}})}}{2R_{ba}} \quad (3.57)$$

c) Troisième cas : $P_{fc\text{min}} > P_{fc\text{ref}}$, la puissance $P_{fc\text{ref}}$ est fixée à $P_{fc\text{min}}$ et le nouveau courant i_{bareff} est obtenu en substituant (3.52) dans (3.53). Sa valeur est donnée par :

$$i_{\text{bareff}}(t) = \frac{\frac{Q_{ba}(t)}{C_{ba}} - \sqrt{\left(\frac{Q_{ba}(t)}{C_{ba}}\right)^2 - 4R_{ba}(P_{lo}(t) - P_{fc\text{min}})}}{2R_{ba}} \quad (3.58)$$

❖ Afin de préserver les batteries pour d'autres cycles de fonctionnement, la quantité de charge stockée à la fin de chaque cycle doit être ramenée à une valeur finale vérifiant les relations (3.59) et (3.60).

$$v_{ba}(t_f) = \frac{2}{2C_{ba} + 1} Q_{ba}(t_0) \quad (3.59)$$

$$Q_{ba}(t_f) = \frac{2C_{ba}}{2C_{ba} + 1} Q_{ba}(t_0) \quad (3.60)$$

En résumé, la trajectoire du courant de référence i_{bareff} des batteries permettant la minimisation de l'énergie fournie par les piles à combustible en tenant compte des contraintes sur la puissance des piles et l'état final des batteries, est décrite par le système d'équations suivant :

$$i_{\text{bareff}}(t) = \frac{-2C_{ba}Q_{\text{bareff}} + Q_{ba}(t_0)(1 + 2C_{ba})}{2R_{ba}C_{ba} + (1 + 2C_{ba})(t_f - t_0)} \quad \text{Si :} \quad P_{fc\text{min}} \leq P_{fc\text{ref}} \leq P_{fc\text{max}} \quad (3.61)$$

$$i_{\text{bareff}}(t) = \frac{\frac{Q_{ba}(t)}{C_{ba}} - \sqrt{\left(\frac{Q_{ba}(t)}{C_{ba}}\right)^2 - 4R_{ba}(P_{lo}(t) - P_{fc\text{max}})}}{2R_{ba}} \quad \text{Si :} \quad P_{fc\text{ref}} > P_{fc\text{max}} \quad (3.62)$$

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

$$i_{\text{bareff}}(t) = \frac{\frac{Q_{\text{ba}}(t)}{C_{\text{ba}}} - \sqrt{\left(\frac{Q_{\text{ba}}(t)}{C_{\text{ba}}}\right)^2 - 4R_{\text{ba}}(P_{\text{lo}}(t) - P_{\text{fc min}})}}{2R_{\text{ba}}} \quad \text{Si :} \quad (3.63)$$

$$P_{\text{fc min}} > P_{\text{fc ref}}$$

À partir des relations (3.61), (3.62) et (3.63), nous pouvons constater que la trajectoire i_{bareff} dépend de la valeur de la quantité de charge initiale $Q_{\text{ba}}(t_0)$ stockée dans les batteries pour $t = t_0$.

3.3.2.2. Principe basé sur l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman

Le but est toujours de résoudre le problème de l'optimisation de la gestion de l'énergie électrique dans le système hybride à piles à combustible, en cherchant la trajectoire du courant de référence des batteries qui minimisera l'énergie fournie par les piles en considérant la quantité de charge finale stockée dans les batteries comme contrainte à respecter.

Pour que le problème de gestion optimale de l'énergie soit affine-quadratique en u , nous posons :

$$x(t) = Q_{\text{ba}}(t) \quad (3.64)$$

$$\dot{x}(t) = -i_{\text{ba}}(t) \quad (3.65)$$

$$x_{\text{ref}} = Q_{\text{baref}} \quad (3.66)$$

$$u(t) = i_{\text{ba}}(t) - \frac{Q_{\text{ba}}(t)}{2R_{\text{ba}}C_{\text{ba}}} \quad (3.67)$$

$$l(t, x, u) = P_{\text{lo}}(t) - P_{\text{ba}}(t) \quad (3.68)$$

$$d_f(t_f, x(t_f)) = (x(t_f) - x_{\text{ref}})^2 \quad (3.69)$$

(3.68) →

$$l(t, x, u) = P_{\text{lo}}(t) - \frac{1}{C_{\text{ba}}} x(t)i_{\text{ba}}(t) + R_{\text{ba}}i_{\text{ba}}(t)^2 \quad (3.70)$$

$$l(t, x, u) = P_{\text{lo}}(t) - \frac{1}{C_{\text{ba}}} Q_{\text{ba}}(t) \left[u(t) + \frac{Q_{\text{ba}}(t)}{2R_{\text{ba}}C_{\text{ba}}} \right] + R_{\text{ba}} \left[u(t) + \frac{Q_{\text{ba}}(t)}{2R_{\text{ba}}C_{\text{ba}}} \right]^2 \quad (3.71)$$

❖ Le problème de la gestion de l'énergie peut être résumé comme suit :

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = -u(t) - \frac{x(t)}{2R_{ba}C_{ba}} \\ l(x, t, u) = P_{I_0}(t) - \frac{x(t)^2}{4R_{ba}C_{ba}^2} + R_{ba}u(t)^2 \end{array} \right. \quad (3.72)$$

❖ En utilisant les équations (3.13) et (3.14), nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} f(t, x) = -\frac{x(t)}{2R_{ba}C_{ba}} \\ g(t, x) = -1 \\ L(t, x) = P_{I_0}(t) - \frac{x(t)^2}{4R_{ba}C_{ba}^2} \\ R(t, x) = R_{ba} \end{array} \right. \quad (3.73)$$

❖ Le remplacement de ce système d'équations dans la relation (3.17) permet d'écrire :

$$\begin{aligned} -\frac{\partial V(t, x)}{\partial t} &= P_{I_0}(t) - \frac{x(t)^2}{4R_{ba}C_{ba}^2} - \frac{1}{4} \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} R_{ba}^{-1} \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \left(-\frac{x(t)}{2R_{ba}C_{ba}} \right) \end{aligned} \quad (3.74)$$

D'où la mise en œuvre de l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman sous la forme suivante :

$$-\frac{\partial V(t, x)}{\partial t} = P_{I_0}(t) - \frac{x(t)^2}{4R_{ba}C_{ba}^2} - \frac{1}{4R_{ba}} \left(\frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right)^2 - \frac{x(t)}{2R_{ba}C_{ba}} \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \quad (3.75)$$

❖ La résolution de cette équation aux dérivées partielles revient à chercher une solution sous la forme [4-5] :

$$V(t, x) = a_0(t)x^2(t) + a_1(t)x(t) + a_2(t) \quad (3.76)$$

❖ Par rapport au temps t, la dérivation de la fonction V(t, x) donne :

$$\frac{\partial V(t, x)}{\partial t} = \dot{a}_0(t)x^2(t) + \dot{a}_1(t)x(t) + \dot{a}_2(t) \quad (3.77)$$

Et par rapport à la variable d'état x donne :

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

$$\frac{\partial V(t, x)}{\partial x} = 2a_0(t)x(t) + a_1(t) \quad (3.78)$$

⇒

$$\left(\frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right)^2 = 4a_0^2(t)x^2(t) + 4a_0(t)a_1(t)x(t) + a_1^2(t) \quad (3.79)$$

❖ En remplaçant les équations (3.77), (3.78) et (3.79) dans (3.75), les fonctions $a_0(t)$, $a_1(t)$ et $a_2(t)$ sont alors identifiées :

$$\begin{cases} \dot{a}_0(t) = \frac{1}{R_{ba}} a_0^2(t) + \frac{1}{R_{ba} C_{ba}} a_0(t) + \frac{1}{4R_{ba} C_{ba}^2} \\ \dot{a}_1(t) = \frac{1}{R_{ba}} a_0(t) + \frac{1}{2R_{ba} C_{ba}} a_1(t) \\ \dot{a}_2(t) = \frac{1}{4R_{ba}} a_1^2(t) - P_{lo}(t) \end{cases} \quad (3.80)$$

❖ La résolution de la première équation différentielle donne :

$$a_0(t) = \frac{R_{ba}}{-t + K_0 R_{ba}} - \frac{1}{2C_{ba}} \quad (3.81)$$

❖ Ayant trouvée $a_0(t)$, nous procédons à la recherche de $a_1(t)$ qui est exprimée par :

$$a_1(t) = \frac{-K_1}{-t + K_0 R_{ba}} \quad (3.82)$$

❖ En utilisant les relations (3.81) et (3.82), nous aboutissons à l'expression de la fonction $a_2(t)$:

$$a_2(t) = \frac{K_1^2}{4R_{ba}} \frac{1}{-t + 2K_0 R_{ba}} + K_2 - \int_{t_0}^t P_{lo}(t) dt \quad (3.83)$$

K_0 , K_1 et K_2 sont des constantes réelles à déterminer à partir de la condition au temps final, c'est-à-dire :

$$V(t_f, x_f) = a_0(t_f)x_f^2 + a_1(t_f)x_f + a_2(t_f) = (x(t_f) - x_{ref})^2 \quad (3.84)$$

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

Ce qui permet d'écrire :

$$\begin{cases} a_0(t_f) = 1 \\ a_1(t_f) = -2x_{\text{ref}} \\ a_2(t_f) = x_{\text{ref}}^2 \end{cases} \quad (3.85)$$

❖ Ainsi, les expressions de K_0 , K_1 et K_2 sont déterminées par :

$$\begin{cases} K_0 = \frac{t_f}{R_{ba}} + \frac{2C_{ba}}{2C_{ba} + 1} \\ K_1 = \frac{-4R_{ba}C_{ba}}{2C_{ba} + 1} x_{\text{ref}} \\ K_2 = \int_{t_0}^{t_f} P_{1o}(t)dt + \frac{1}{2C_{ba} + 1} x_{\text{ref}}^2 \end{cases} \quad (3.86)$$

❖ En combinant les relations (3.76), (3.81), (3.82), (3.83) et (3.86), la fonction $V(t, x)$ peut être écrite comme suit :

$$\begin{aligned} V(t, x) = & \left(\frac{R_{ba}(2C_{ba} + 1)}{2R_{ba}C_{ba} + (2C_{ba} + 1)(t_f - t)} - \frac{1}{2C_{ba}} \right) x^2(t) \\ & - \left(\frac{4R_{ba}C_{ba}}{2R_{ba}C_{ba} + (2C_{ba} + 1)(t_f - t)} x_{\text{ref}} \right) x(t) + \\ & \left(\frac{(t_f - t) + 2R_{ba}C_{ba}}{2R_{ba}C_{ba} + (2C_{ba} + 1)(t_f - t)} x_{\text{ref}}^2 + \int_{t_0}^{t_f} P_{1o}(t)dt \right) \end{aligned} \quad (3.87)$$

D'où la commande optimale u_{ref} satisfera en appliquant l'équation (3.16) :

$$u_{\text{ref}}(t, x) = -\frac{1}{2R_{ba}} \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \quad (3.88)$$

Et :

$$i_{\text{baref}}(t, x) = \frac{-2C_{ba}x_{\text{ref}} + (2C_{ba} + 1)}{2R_{ba}C_{ba} + (2C_{ba} + 1)(t_f - t)} x(t) - \frac{1}{2R_{ba}C_{ba}} x(t) \quad (3.89)$$

Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome

❖ Comme l'indique l'équation (3.67), la trajectoire du courant de référence i_{baref} qui minimise l'énergie fournie par les piles à combustible peut être exprimé par :

$$I_{baref}(t, x) = u_{ref}(t, x) + \frac{1}{2R_{ba}C_{ba}} x(t) \quad (3.90)$$

Où :

$$i_{baref}(t) = \frac{-2C_{ba}Q_{baref} + (2C_{ba} + 1)}{2R_{ba}C_{ba} + (2C_{ba} + 1)(t_f - t)} Q_{ba}(t) \quad (3.91)$$

Avec : $t \leq t_f$

L'équation (3.91) démontre que la trajectoire i_{baref} dépend de la valeur de la quantité de charge $Q_{ba}(t)$ stockée dans les batteries à l'instant t .

Pour $t = t_0$, nous aboutissons à la même expression du courant fournie par la commande optimale basée sur la technique d'Euler-Lagrange (voir équation (3.51)) qui sera optée pour la suite du travail.

3.3.3. Application de la commande plate

Pour assurer la stabilité de la tension aux bornes du bus continu qui garantit le cheminement de l'énergie produite de la source vers la charge, une stratégie de commande basée sur la notion de la platitude différentielle est exposée. Dans ce travail, cette stratégie repose sur l'utilisation des supercondensateurs en particulier lorsque la robustesse et la réponse dynamique sont concernées.

L'analyse de la platitude différentielle du système hybride piles à combustible consiste à vérifier les conditions décrites par les équations (3.24) et (3.25).

3.3.3.1. Etude de la platitude du système

En considérant les notations montrées sur la figure 3.1, les équations régissant le fonctionnement du système peuvent être écrites de la façon suivante :

➤ Les courants i_{fc} , i_{ba} et i_{sc} :

$$i_{fc}(t) = \frac{P_{fc}(t)}{v_{fc}(t)} \quad (3.92)$$

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

$$i_{ba}(t) = \frac{P_{ba}(t)}{v_{ba}(t)} \quad (3.93)$$

$$i_{sc}(t) = \frac{P_{sc}(t)}{v_{sc}(t)} \quad (3.94)$$

➤ L'énergie électrostatique y_{dc} stockée dans la capacité du bus continu :

$$y_{dc}(t) = \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}(t)^2 \quad (3.95)$$

➤ L'énergie y_{dc} en fonction des puissances P_{fc} , P_{ba} , P_{sc} et P_{lo} :

$$\dot{y}_{dc}(t) = P_{dc}(t) = P_{fc}(t) + P_{ba}(t) + P_{sc}(t) - P_{Lo}(t) \quad (3.96)$$

Avec :

$$P_{fc}(t) = v_{fc}(t) i_{fc}(t) \quad (3.97)$$

$$P_{ba}(t) = v_{ba}(t) i_{ba}(t) \quad (3.98)$$

$$P_{sc}(t) = v_{sc}(t) i_{sc}(t) \quad (3.99)$$

$$P_{lo}(t) = v_{dc}(t) i_{lo}(t) = \sqrt{\frac{2y_{dc}(t)}{C_{dc}}} i_{lo}(t) \quad (3.100)$$

$$P_{dc}(t) = v_{dc}(t) i_{dc}(t) \quad (3.101)$$

Pour démontrer la platitude du système, il faut vérifier qu'il est toujours possible d'exprimer toutes les variables d'état et de contrôle en fonction de la sortie plate et d'un nombre fini de ses dérivées successives. Pour cela, nous définissons :

- v_{dc} comme variable d'état du système,
- y_{dc} comme sortie plate,
- P_{sc} comme variable de contrôle.

• À partir de l'équation (3.95), la variable d'état v_{dc} peut s'écrire comme suit :

$$v_{dc}(t) = \sqrt{\frac{2y_{dc}(t)}{C_{dc}}} = f_{v_{dc}}(y_{dc}(t)) \quad (3.102)$$

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

- Suivant les relations (3.96) et (3.100), la variable de contrôle P_{sc} peut s'écrire comme suit :

$$P_{sc}(t) = \sqrt{\frac{2y_{dc}(t)}{C_{dc}}} \cdot i_{lo}(t) + \dot{y}_{dc}(t) - P_{fc}(t) - P_{ba}(t) = h_{P_{sc}}(y_{dc}(t), \dot{y}_{dc}(t)) \quad (3.103)$$

$\Rightarrow v_{dc}(t) = f_{v_{dc}}(y_{dc}(t))$ et $P_{sc}(t) = h_{P_{sc}}(y_{dc}(t), \dot{y}_{dc}(t))$, alors : le système peut être considéré au sens de M. Fliess et al. comme « différentiellement plat ».

3.3.3.2. Planification de la trajectoire de référence

Soit $y_{dcréf}$ la trajectoire de référence souhaitée pour la sortie plate y_{dc} . L'énergie $y_{dcréf}$ est donnée par :

$$y_{dcréf}(t) = \frac{1}{2} C_{dc} v_{dcréf}(t)^2 \quad (3.104)$$

Un filtre passe-bas du deuxième ordre peut être introduit dans le but de minimiser les appels de puissances en régime transitoire.

3.3.3.3. Synthèse des lois de commande

Comme détaillé dans [7, 12, 35-37, 51-58, 68-69], une loi de contrôle régissant l'évolution de l'erreur "en énergie" ($\varepsilon = y_{dcréf} - y_{dc}$), de manière à permettre une convergence asymptotique de l'erreur vers zéro, est utilisée. Elle est décrite par :

$$(\dot{y}_{dc}(t) - \dot{y}_{dcréf}(t)) + k_{11}(y_{dc}(t) - y_{dcréf}(t)) + k_{12} \int_0^t (y_{dc}(t) - y_{dcréf}(t)) dt = 0 \quad (3.105)$$

La partie intégrale est introduite pour assurer une erreur statique nulle en régime établi, et compenser les erreurs de modélisation et/ou les erreurs liées aux incertitudes paramétriques.

Le choix des coefficients k_{11} et k_{12} s'effectue en étudiant les racines de l'équation caractéristique équivalente sur l'erreur :

$$s^2 + k_{11}s + k_{12} = 0 \quad (3.106)$$

Avec :

$$\begin{cases} k_{11} = 2\xi w_n \\ k_{12} = W_n^2 \end{cases} \quad (3.107)$$

ξ et w_n représentent le coefficient d'amortissement et la pulsation naturelle.

Etant k_{11} et k_{12} positifs, les racines de l'équation caractéristique équivalente ont des parties réelles négatives qui assurent la stabilité du système.

3.3.4. Asservissement des courants

Pour asservir les courants des différentes sources d'énergie constituant l'architecture hybride étudiée, plusieurs techniques peuvent être utilisées. Celle dite : MLI (Modulation de largeur d'impulsion) adopte des correcteurs linéaires comme le PI et le RST, ou bien non linéaires tels que le mode glissant et la linéarisation entrée/sortie.

Les ordres de commutation des interrupteurs des convertisseurs associés à chaque source sont obtenus par comparaison de la sortie du correcteur à un signal porteur. Cette méthode facile d'utilisation, permet d'assurer un fonctionnement à fréquence de découpage fixe, et d'identifier parfaitement le contenu harmonique [58].

Pour ces raisons, cette technique, en plus d'un correcteur PI, sera optée dans le but d'asservir les courants de la source hybride piles à combustible à leurs références obtenues par application de la commande optimale/plate.

3.3.5. Résultats des tests

Dans cette partie, nous allons tester les performances de la commande hybride proposée en utilisant l'outil « Matlab/Simulink ». Ainsi, trois tests de confirmation sont proposés en fonction de l'état initial des batteries.

- 1) **Premier test :** batteries chargées à leur tension nominale, c'est-à-dire : $v_{ba}(t=0) = 28.8V$.
- 2) **Deuxième test :** batteries chargées à 75%, c'est-à-dire : $v_{ba}(t=0) = 30V$.
- 3) **Troisième test :** batteries complètement chargées, c'est-à-dire : $v_{ba}(t=0) = 31.2V$.

Les paramètres du système hybride autonome sont groupés dans le tableau 3.

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

Symbole	Appellation	Valeur
Piles à combustible		
V_{fcn}	Tension nominale [V]	38.2
P_{fcmax}	Puissance maximale [W]	300
P_{fcmin}	Puissance minimale [W]	35
Batteries lithium-ion		
V_{ban}	Tension nominale [V]	28.8
C_{ban}	Capacité [Ah]	182
C_{ba}	Capacité [F]	40
R_{ba}	Résistance [Ω]	0.015
$Q_{baréf1}$	Quantité de charge initiale stockée pour le premier test [C]	1152
$Q_{baréf2}$	Quantité de charge initiale stockée pour le deuxième test [C]	1200
$Q_{baréf3}$	Quantité de charge initiale stockée pour le troisième test [C]	1248
Supercondensateurs		
V_{scn}	Tension nominale [V]	32.4
C_{sc}	Capacité [F]	25
R_{sc}	Résistance [Ω]	0.06
Bus continu		
$V_{dcréf}$	Tension de référence [V]	48
C_{dc}	Capacité [F]	0.0036

Tableau 3.1 : Paramètres du système hybride autonome

Pour vérifier la robustesse et la précision du concept de la commande hybride optimale/plate proposée, nous imposons un profil de consommation journalier comme montré sur la figure 3.2.

Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome

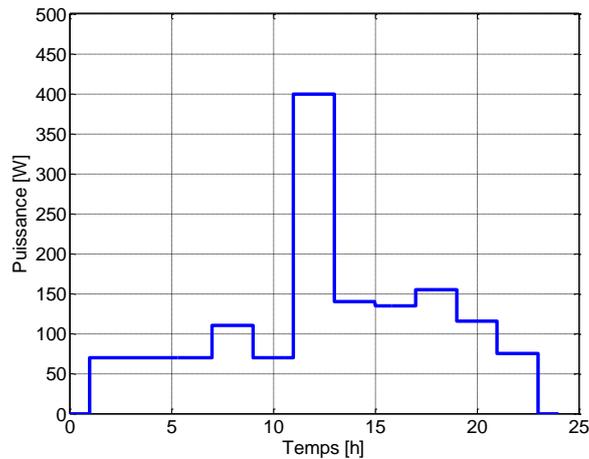


Figure 3.2 : Profil de consommation

➤ Analysons, maintenant, les résultats des trois tests proposés.

3.3.5.1. Premier test : batteries lithium-ion chargées à leur tension nominale

Les résultats de simulation suivants exposent la réponse du système en appliquant les lois de contrôle proposées. Pour prouver leur efficacité, le profil de puissance résultant sur la figure 3.2 sera utilisé.

La tension du bus DC est initialisée à 50V, et sa valeur de référence est fixée à 48V. Pour les batteries, elles sont initialement chargées à leur tension nominale de 28.8V.

La figure 3.3 présente la puissance consommée par la charge et celle fournie par les piles à combustible/batteries.

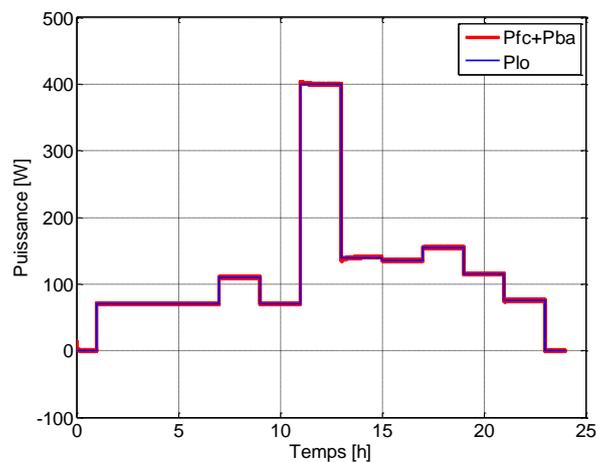


Figure 3.3 : Puissance consommée par la charge et celle fournie par l'ensemble piles/batteries

Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome

La fourniture de puissance est assurée par l'ensemble piles/batteries satisfaisant à chaque instant l'équation d'équilibre des puissances suivante :

$$P_{fc}(t) + P_{ba}(t) = P_{lo}(t) \quad (3.108)$$

La figure 3.4 démontre les transferts des puissances dans le système hybride. La puissance des piles est limitée entre sa valeur minimale de 35W et maximale de 300W. Concernant les batteries, elles fournissent la différence de puissance entre les piles et la charge.

Dans le cas où la puissance consommée par la charge est nulle (durant les intervalles de $t = 0$ à $t = 1$ h et de $t = 23$ à $t = 24$ h), les piles fournissent leur puissance minimale pour charger les batteries. Ainsi, ces dernières absorbent une puissance négative de -35W.

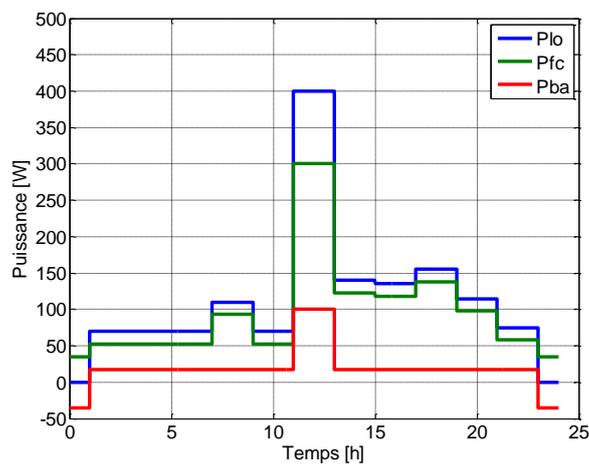


Figure 3.4 : Transferts des puissances

Sur la figure 3.5, nous présentons les allures de la tension du bus continu et l'énergie stockée dans sa capacité.

Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome

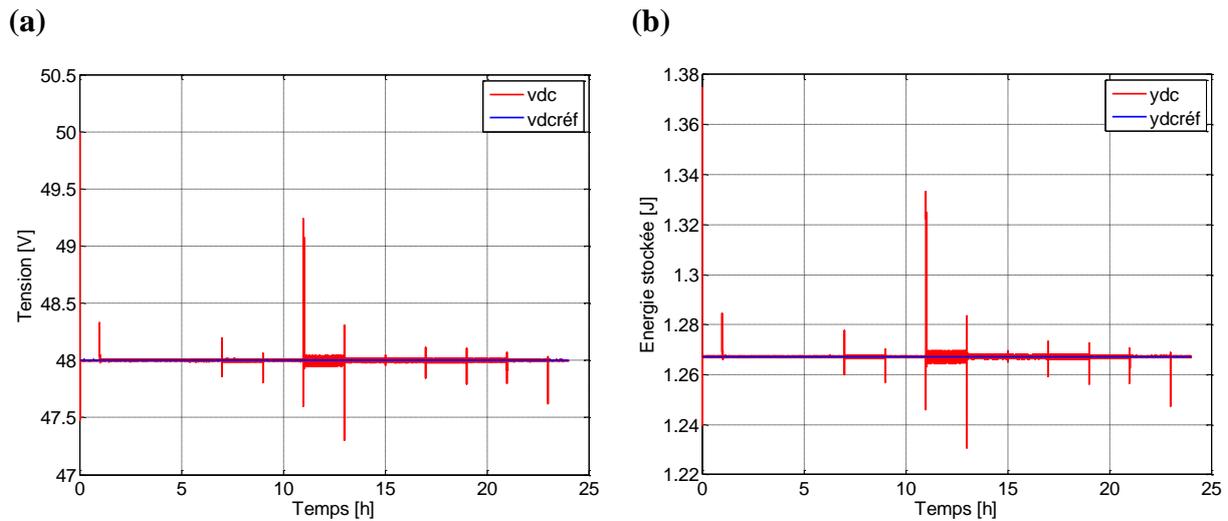


Figure 3.5 : (a) : Tension du bus continu et sa référence ;
(b) : Energie stockée dans le bus continu et sa référence

La tension v_{dc} suit parfaitement sa référence de 48V avec l'observation de très faibles dépassements lors des changements de puissances. Par conséquent, nous pouvons conclure que le système avec le principe de contrôle proposé est robuste.

Sur les figures 3.7.a et 3.7.b, sont tracées les allures de la tension des batteries et la quantité de charge stockée correspondante.

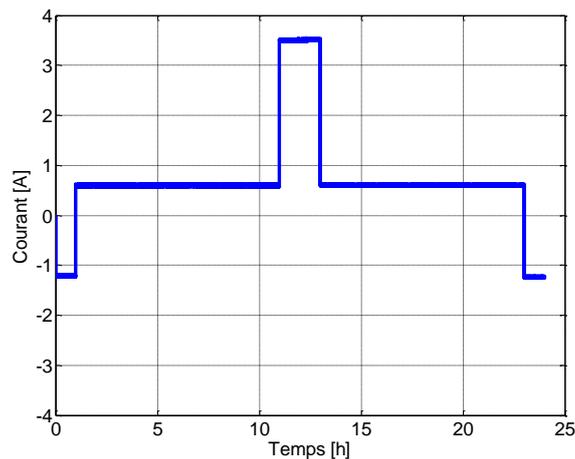
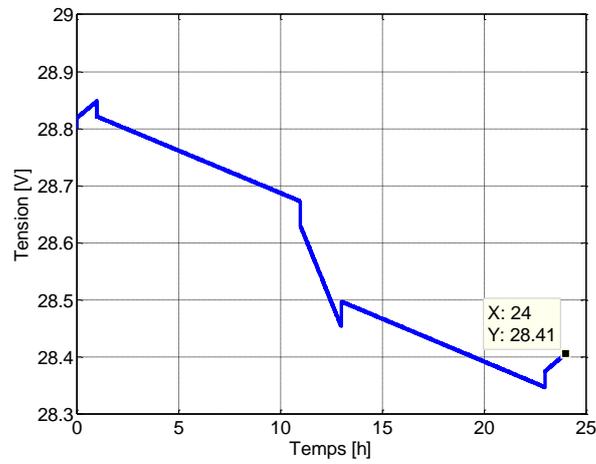


Figure 3.6 : Courant des batteries

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

(a)



(b)

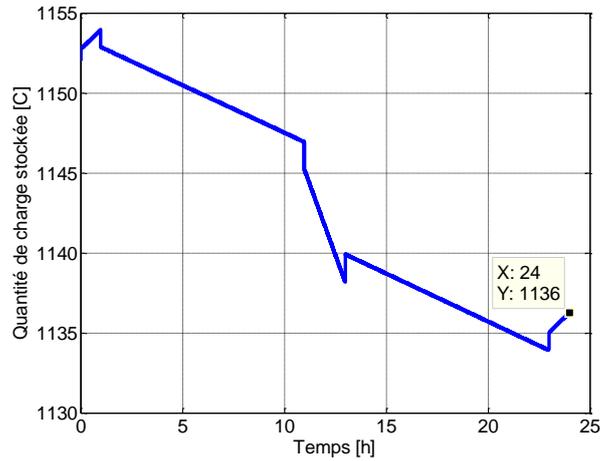


Figure 3.7 : (a) : Tension des batteries ; (b) : Quantité de charge stockée dans les batteries pour le premier test

Les figures 3.7.a et 3.7.b prouvent que la tension des batteries et la quantité de charge stockée sont stabilisées à $v_{ba}(t_f) = 28.4V$ et $Q_{ba}(t_f) = 1136C$ après que celles-ci étaient soumises au profil du courant indiqué sur la figure 3.6. Ces deux valeurs confirment bien les relations (3.59) et (3.60) fournies par la commande optimale.

Nous pouvons vérifier d'après les équations (3.59) et (3.60) que :

$$v_{ba}(t_f) = \frac{2}{2C_b + 1} Q_{ba}(0) = \frac{2}{2 \times 40 + 1} 1152 = 28.4V$$

$$Q_{ba}(t_f) = \frac{2C_b}{2C_b + 1} Q_{ba}(0) = \frac{2 \times 40}{2 \times 40 + 1} 1152 = 1136C$$

Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome

D'autre part, et comme mentionné dans la section 3.3.1, le rôle des supercondensateurs est de fournir ou absorber la puissance nécessaire à la régulation de la tension du bus DC à travers lequel se font les échanges des puissances.

La figure 3.8 démontre que la puissance des supercondensateurs suit parfaitement celle fournie par application de la loi de commande présentée dans l'équation (3.105), expliquant, ainsi, la bonne régulation de la tension v_{dc} à sa référence (voir figure 3.5.a). Nous obtiendrons :

$$P_{sc}(t) = \dot{y}_{dc}(t) = P_{dc}(t) \quad (3.109)$$

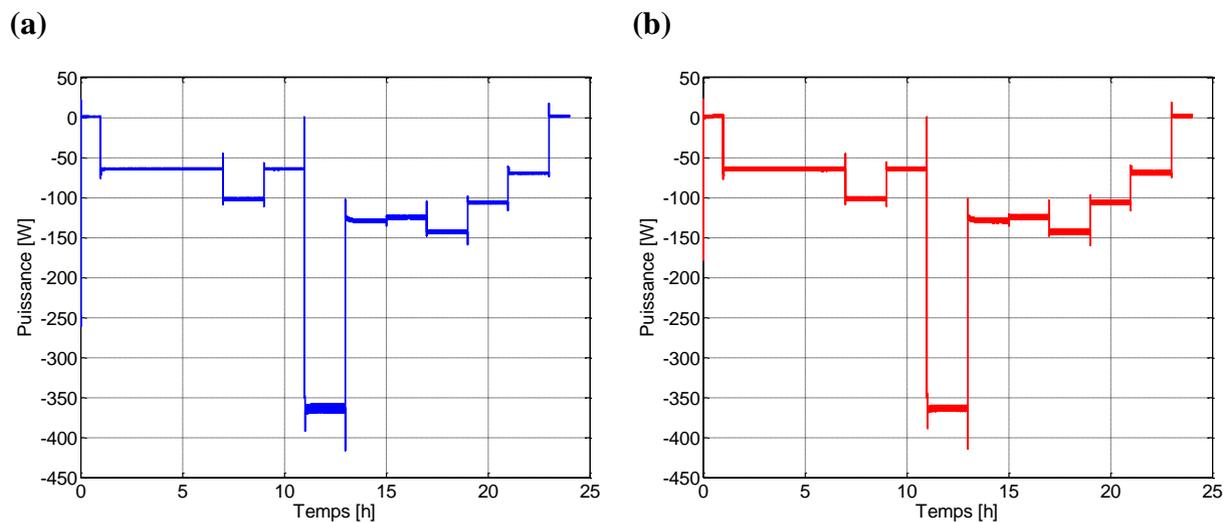


Figure 3.8 : (a) : Puissance de référence des supercondensateurs ; (b) : Puissance des supercondensateurs

Comme la variation de la puissance consommée par la charge conduira, dans tous les cas de figure, à la modification de la tension imposée aux bornes de la charge (ou aux bornes du bus continu), les supercondensateurs absorbent en permanence (dans le cas du présent système) l'énergie nécessaire à la régulation de la tension du bus DC (voir figure 3.8) ; c'est-à-dire : $P_{sc}(t) < 0$ pour $t = 0$ à $t = 24h$.

Les résultats qui suivent notent les allures des courants et tensions des piles à combustible et supercondensateurs.

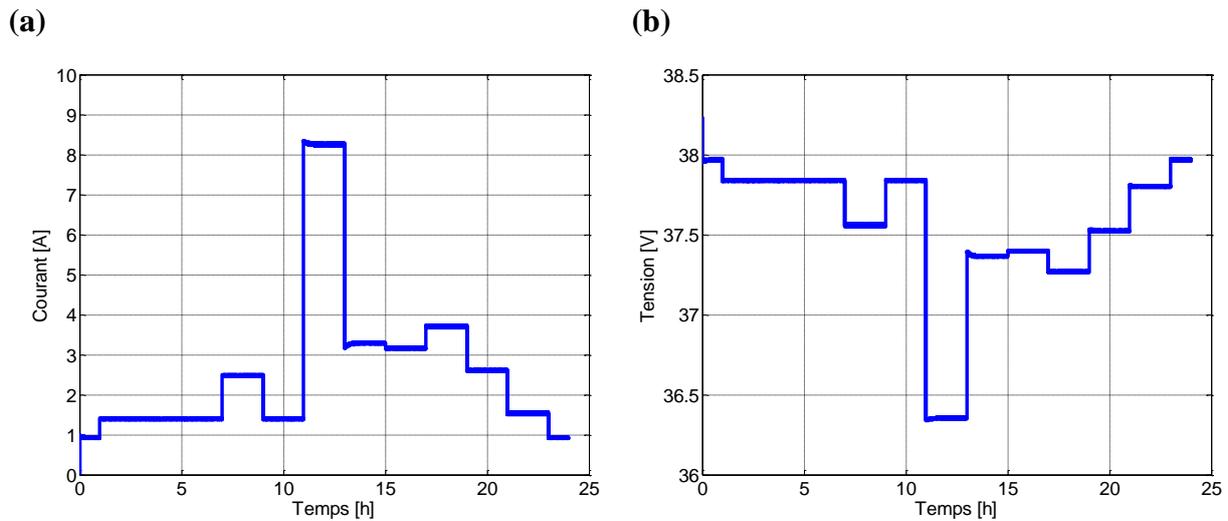


Figure 3.9 : (a) : Courant des piles ; (b) : Tension des piles

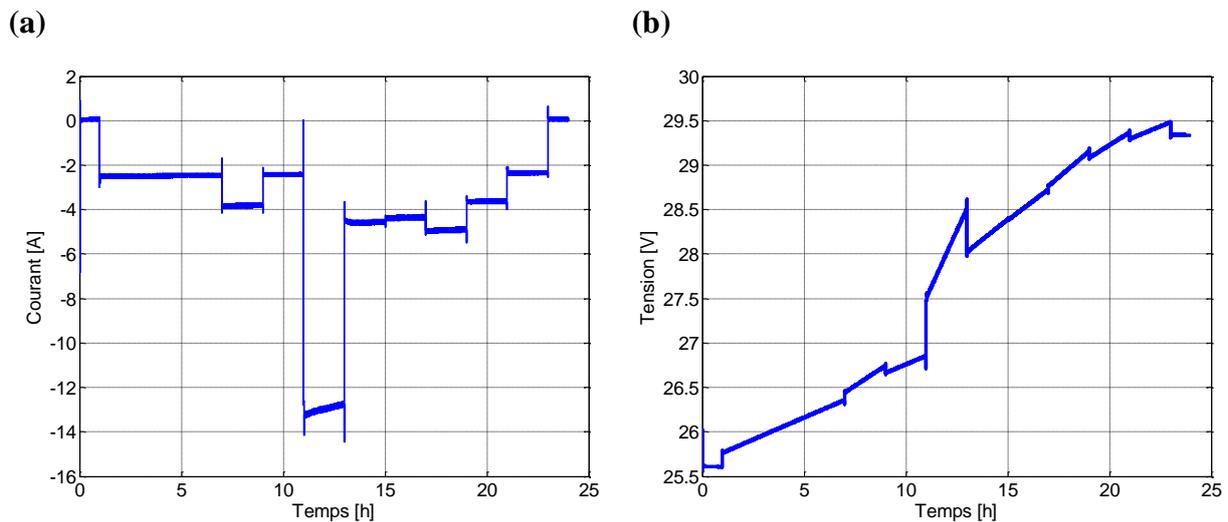


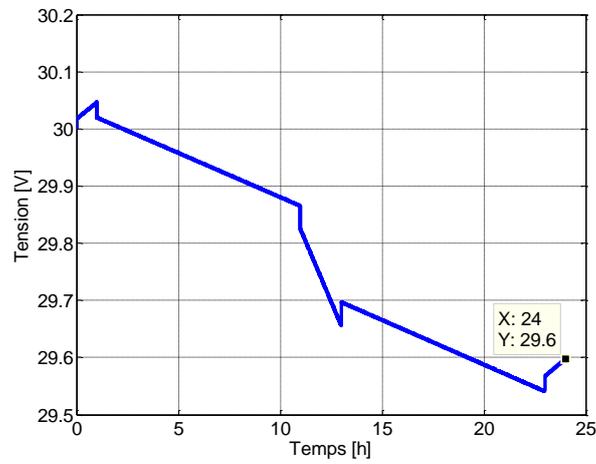
Figure 3.10 : (a) : Courant des supercondensateurs ; (b) : Tension des supercondensateurs

3.3.5.2. Deuxième test : batteries lithium-ion chargées à 75%

En gardant le même profil de consommation utilisé pour le premier test, la tension des batteries et la quantité de charge stockée sont stabilisées à $v_{ba}(t_f) = 29.6V$ et $Q_{ba}(t_f) = 1184C$ (voir figures 3.11.b et 3.11.c) pour une tension au démarrage $v_{ba}(0) = 30V$ correspondante à une quantité de charge stockée $Q_{ba}(0) = 1200C$.

**Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible
totalement autonome**

(a)



(b)

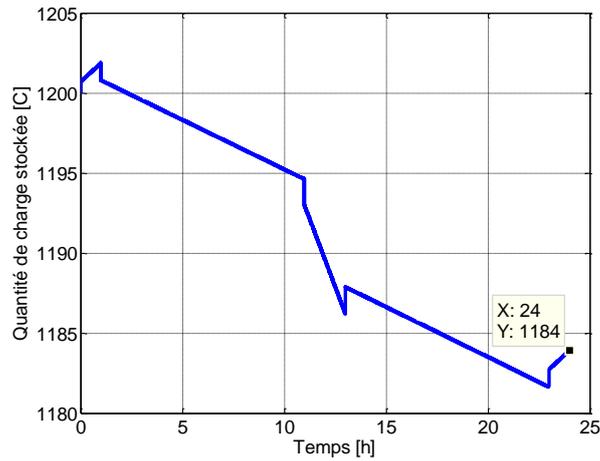


Figure 3.11 : (a) : Tension des batteries ; (b) : Quantité de charge stockée dans les batteries pour le deuxième test

À $t_f = 24h$, $v_{ba}(t_f)$ et $Q_{ba}(t_f)$ vérifient bien les relations (3.59) et (3.60) fournies par la commande optimale.

Nous pouvons vérifier pour ce test que :

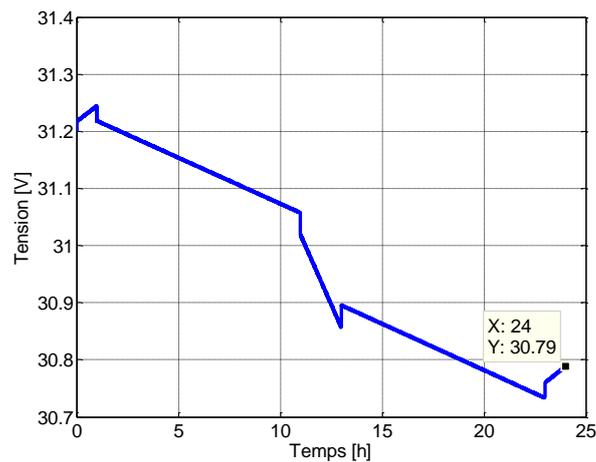
$$v_{ba}(t_f) = \frac{2}{2C_b + 1} Q_{ba}(0) = \frac{2}{2 \times 40 + 1} 1200 = 29.6V$$

$$Q_{ba}(t_f) = \frac{2C_b}{2C_b + 1} Q_{ba}(0) = \frac{2 \times 40}{2 \times 40 + 1} 1200 = 1184C$$

3.3.5.3. Troisième test : batteries lithium-ion complètement chargées

La troisième simulation effectuée pour $v_{ba}(0) = 31.2V$ et $Q_{ba}(0) = 1248C$ au démarrage du système prouve que quelle que soit la tension des batteries et la quantité de charge stockée initiales, ces deux valeurs vérifient bien les équations obtenues par la commande optimale (voir figures 3.12.b et 3.12.c).

(a)



(b)

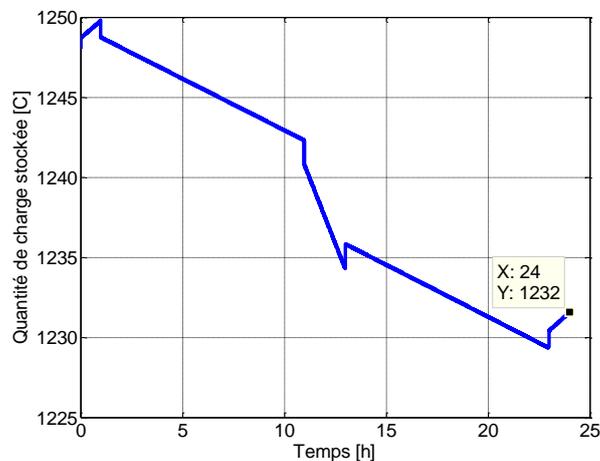


Figure 3.12 : (a) : Tension des batteries ; (b) : Quantité de charge stockée dans les batteries pour le troisième test

Pour ce test :

$$v_{ba}(t_f) = \frac{2}{2C_b + 1} Q_{ba}(0) = \frac{2}{2 \times 40 + 1} 1248 = 30.8V$$

$$Q_{ba}(t_f) = \frac{2C_b}{2C_b + 1} Q_{ba}(0) = \frac{2 \times 40}{2 \times 40 + 1} 1248 = 1232C$$

Chapitre 3 : Commande optimale/plate du système hybride piles à combustible totalement autonome

À partir des résultats obtenus de différents tests, les conclusions suivantes peuvent être formulées :

- ✓ Les besoins en puissance de la charge sont satisfaits, et à travers un bus continu de tension stabilisée,
- ✓ La puissance fournie par les piles à combustible varie dans l'intervalle $[P_{f_{\min}}, P_{f_{\max}}]$,
- ✓ Les batteries fournissent ou absorbent la différence de puissance entre les piles et la charge,
- ✓ La contrainte sur l'état de charge final des batteries est vérifiée en appliquant la commande optimale fondée sur la technique d'Euler-Lagrange,
- ✓ Les supercondensateurs fournissent ou absorbent la puissance nécessaire à la régulation de la tension du bus capacitif,
- ✓ Les états finaux des éléments de stockage sont acceptables. Alors, la durée de vie du système hybride est théoriquement augmentée.

3.5. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre a été la gestion et l'optimisation du fonctionnement d'un système de conversion d'énergie électrique hybride d'alimentation domestique composé de trois sources : l'une principale constituée de piles combustible PEM, les autres secondaires composées de batteries lithium-ion et de supercondensateurs.

En optant une commande optimale basée sur le principe du maximum de Pontriaguine fondé sur l'équation d'Euler-Lagrange, et une autre utilisant les propriétés de la platitude différentielle, les résultats obtenus ont prouvé la robustesse et la précision de la commande hybride optimale/plate sous contraintes optée et ce quelques soient les variations de la puissance sollicitée par l'habitat et l'état de charge initial des batteries.

À partir des résultats escomptés des différents tests de confirmation, nous pouvons conclure que le comportement du système hybride piles à combustible totalement autonome suit bien les exigences décrites dans les sections 3.3.1 et 3.3.3.

Afin de confirmer les performances de la stratégie proposée pour la gestion de l'énergie, une mise en œuvre sur plateforme expérimentale fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4 :

Mise en œuvre expérimentale

4.1. Introduction

Dans le troisième chapitre, le fonctionnement du système hybride piles à combustible totalement autonome a été simulé. Les tests de vérification ont prouvé la robustesse et la précision des lois de commande optées en vue de la gestion de l'énergie. Les résultats étant convaincants, cette dernière partie aura pour objectif la mise en œuvre expérimentale des différentes stratégies développées.

4.2. Nouvelle structure du système hybride autonome

Les divers essais, permettant d'apprécier les performances du système hybride, ont eu lieu au Laboratoire de Modélisation des Systèmes Energétiques (LMSE). Le matériel disponible nous a conduit à procéder à quelques modifications par rapport aux simulations.

4.2.1. Description du banc d'essai expérimental

Afin de mettre en œuvre les algorithmes de contrôle proposés, un banc de tests expérimental a été réalisé au laboratoire MSE. Il comprend les éléments suivants :

- Un émulateur de la pile à combustible PEM 500 W (pile construite par la Société GREEN),
- Deux batteries au plomb étanche (remplaçant ceux au lithium-ion) 12V-100Ah, connectées en série afin d'obtenir une tension nominale de 24V,
- Deux autres batteries au plomb étanche (remplaçant les supercondensateurs) 12V-100Ah reliées en série pour avoir une tension nominale de 24V,
- Un convertisseur DC-DC non isolé, non réversible, à modules IGBT SKM50GB123D (CVS1 dans la figure 4.1), associé à l'émulateur de la pile à combustible,
- Un convertisseur DC-DC non isolé, non réversible, à modules IGBT SKM50GB123D (CVS2 dans la figure 4.1), affecté au premier stack de batteries,
- Un convertisseur DC-DC non isolé, réversible à modules IGBT SKM50GB123D (CVS3 dans la figure 4.1), relié au deuxième stack de batteries,
- Quatre bobines d'une inductance de 1mH pour chacune,
- Une charge resistive variable,
- Un bus continu d'une capacité de 1100 μ F associant les sources d'énergie et la charge,
- Des capteurs de courant de la Société FLUKE, placés à l'entrée et à la sortie de chaque convertisseur,
- Des capteurs de tension de la Société GWINSTEK.

La photo du banc d'essai est représentée sur la figure 4.1.

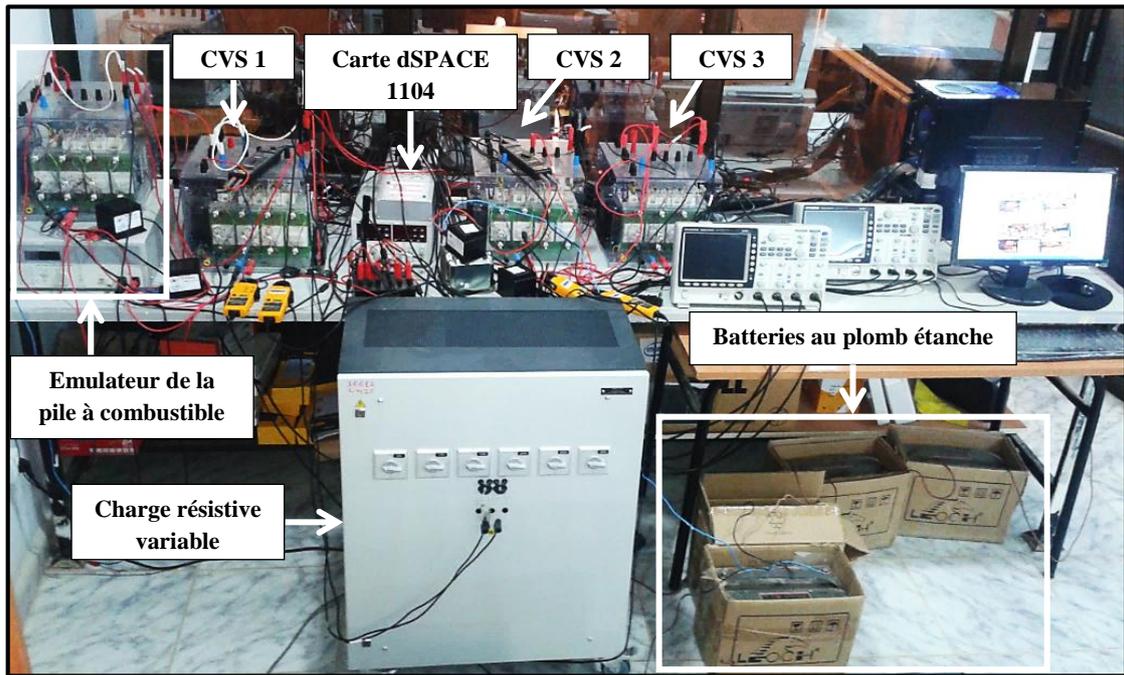


Figure 4.1 : Photo du banc d'essai expérimental

4.2.2. Vérification de la commande optimale/plate proposée

En tenant en compte des modifications apportées sur le schéma présenté sur la figure 3.1, la nouvelle structure du système hybride autonome est schématisée sur la figure 4.2.

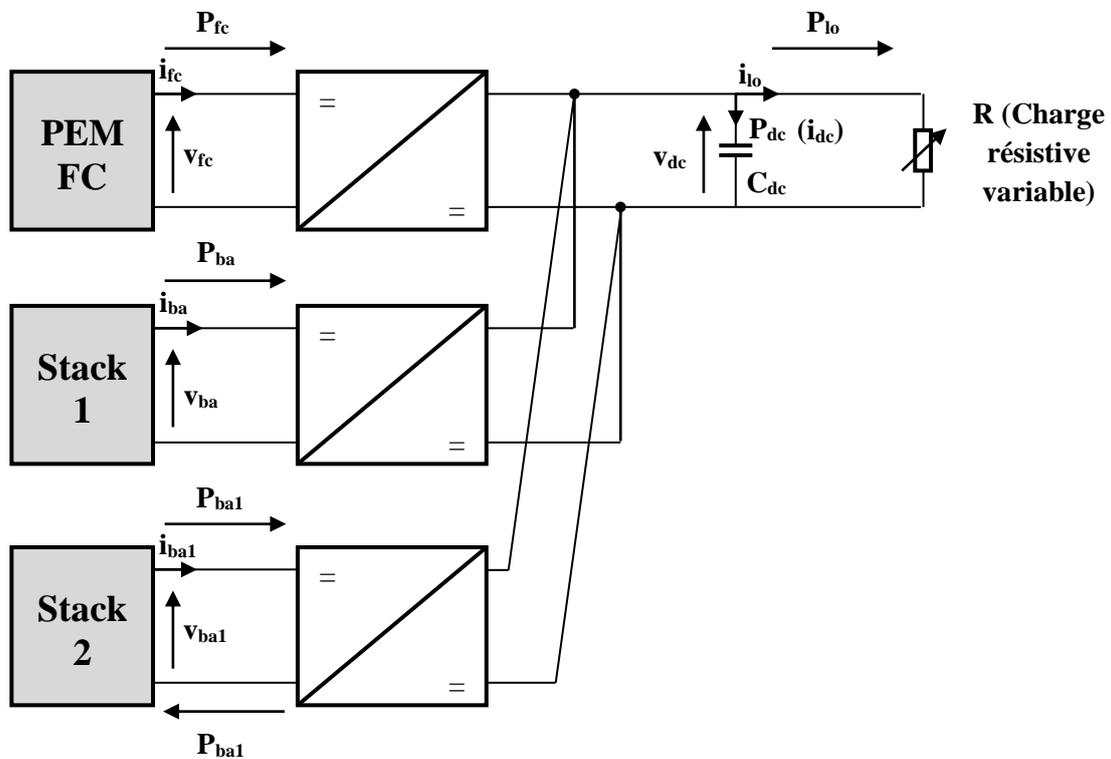


Figure 4.2 : Nouvelle structure du système hybride autonome

En considérant les contraintes sur la puissance de la pile d'une part, et sur l'état de charge final du premier stack de batteries d'autre part, la commande optimale fondée sur la technique d'Euler-Lagrange doit satisfaire à tout moment que :

$$i_{\text{bareff}}(t) = \frac{-2C_{\text{ba}} Q_{\text{bareff}} + Q_{\text{ba}}(t_0)(1 + 2C_{\text{ba}})}{2R_{\text{ba}} C_{\text{ba}} + (1 + 2C_{\text{ba}})(t_f - t_0)} \quad \text{Si :} \quad P_{\text{fc min}} \leq P_{\text{fc ref}} \leq P_{\text{fc max}} \quad (4.1)$$

$$i_{\text{bareff}}(t) = \frac{\frac{Q_{\text{ba}}(t)}{C_{\text{ba}}} - \sqrt{\left(\frac{Q_{\text{ba}}(t)}{C_{\text{ba}}}\right)^2 - 4R_{\text{ba}}(P_{\text{lo}}(t) - P_{\text{fc max}})}}{2R_{\text{ba}}} \quad \text{Si :} \quad P_{\text{fc ref}} > P_{\text{fc max}} \quad (4.2)$$

Et :

$$v_{\text{ba}}(t_f) = \frac{2C_{\text{ba}}}{2C_{\text{ba}} + 1} Q_{\text{ba}}(t_0) \quad (4.3)$$

$$Q_{\text{ba}}(t_f) = \frac{2}{2C_{\text{ba}} + 1} Q_{\text{ba}}(t_0) \quad (4.4)$$

Afin d'assurer une tension stabilisée aux bornes du bus continu assurant le cheminement de l'énergie produite de la source hybride vers la charge, la commande basée sur la notion de la platitude différentielle doit garantir à chaque instant la loi comportementale suivante :

$$(\dot{y}_{\text{dc}}(t) - \dot{y}_{\text{dc ref}}(t)) + k_{11}(y_{\text{dc}}(t) - y_{\text{dc ref}}(t)) + k_{12} \int_0^t (y_{\text{dc}}(t) - y_{\text{dc ref}}(t)) dt = 0 \quad (4.5)$$

Avec :

$$P_{\text{bal}}(t) = \dot{y}_{\text{dc}}(t) = P_{\text{dc}}(t) \quad (4.6)$$

4.2.2.1. Résultats de simulation

Afin de vérifier les performances de la commande optimale/plate optée, l'ensemble du système a été implanté dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Eu égard les paramètres du système hybride autonome résumés dans le tableau 4.1, et le profil de consommation illustré sur la figure 4.3, les divers résultats obtenus sont exposés sur les figures qui suivent.

Symbole	Désignation	Valeur
Pile à combustible		
V_{fcn}	Tension nominale [V]	27.1
P_{fcmax}	Puissance maximale [W]	300
P_{fcmin}	Puissance minimale [W]	35
Batteries (Stack 1)		
V_{ban}	Tension nominale [V]	24
C_{ban}	Capacité nominale [Ah]	100
C_{ba}	Capacité [F]	5
R_{ba}	Résistance [Ω]	0.022
Q_{baref}	Quantité de charge initiale stockée [C]	120
Batteries (Stack 2)		
V_{ba1n}	Tension nominale [V]	24
C_{ba1n}	Capacité nominale [Ah]	100
C_{ba1}	Capacité [F]	5
R_{ba1}	Résistance [Ω]	0.022
Bus continu		
C_{dc}	Capacité [F]	0.0011
$V_{dcréf}$	Tension de référence [V]	48

Tableau 4.1 : Paramètres du nouveau système hybride autonome

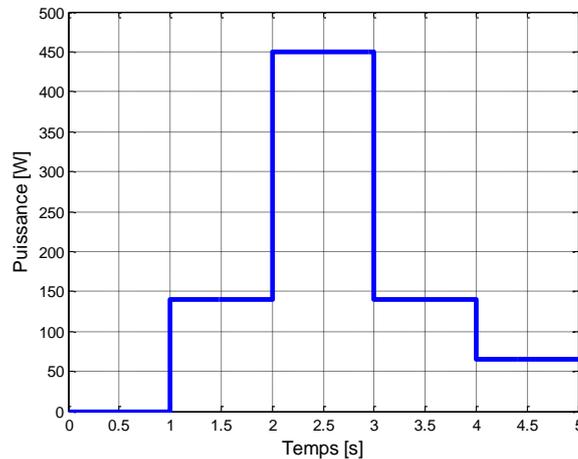


Figure 4.3 : Profil de consommation

Les résultats de simulation suivants exposent la réponse du système en appliquant les lois de contrôle proposées. Pour prouver leur efficacité, le profil de puissance démontré sur la figure 4.2 sera utilisé.

La tension du bus DC est initialisée à 50V, et sa valeur de référence est fixée à 48V. Pour le stack1, il est initialement chargé à sa tension nominale de 24V.

La figure 4.4 définit la puissance consommée par la charge ainsi que celle fournie par l'ensemble pile/stack1.

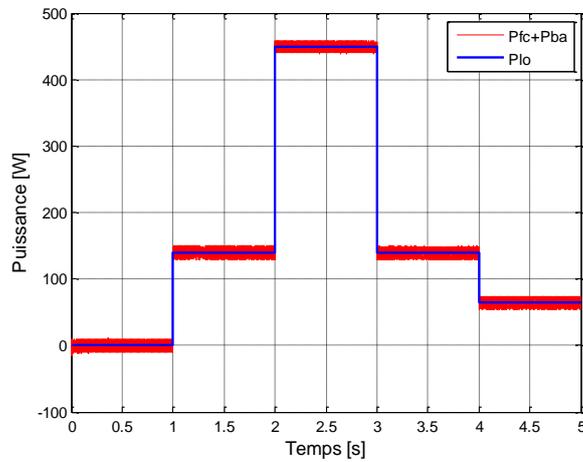


Figure 4.4 : Puissance consommée par la charge et celle fournie par l'ensemble pile/stack1

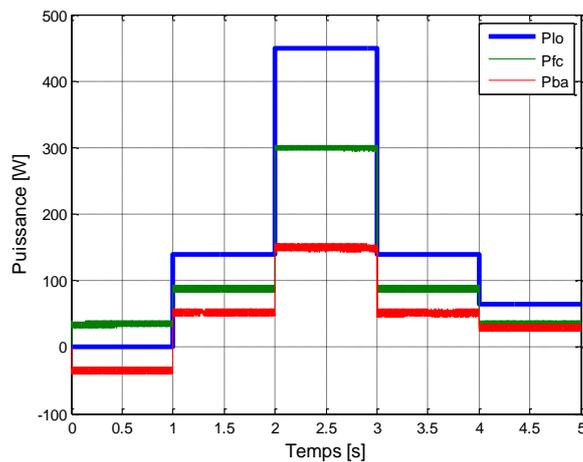


Figure 4.5 : Transferts des puissances

La fourniture de puissance est assurée par l'ensemble « pile + stack1 » vérifiant à tout moment l'équation d'équilibre des puissances :

$$P_{fc}(t) + P_{ba}(t) = P_{lo}(t) \quad (4.7)$$

La figure 4.5 illustre les transferts des puissances dans le système hybride. La puissance de la pile GREEN est limitée entre sa valeur minimale de 0W et maximale de 300W. Concernant le stack1, il fournit la différence de puissance entre la pile et la charge.

Sur la figure 4.6, nous aboutissons aux allures de la tension du bus continu et l'énergie stockée dans sa capacité.

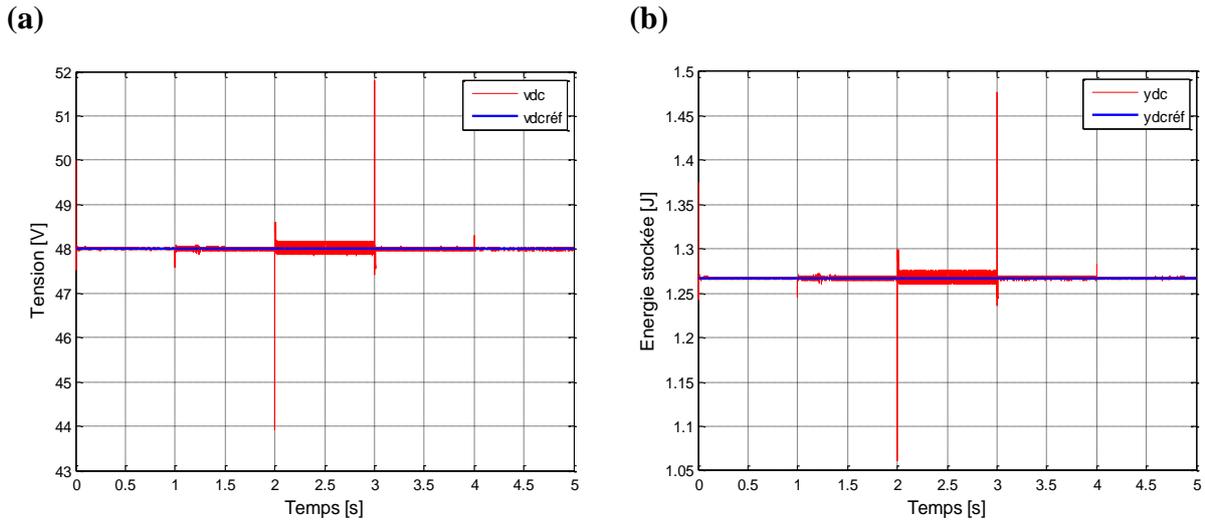


Figure 4.6 : (a) : Tension du bus continu et sa référence ;
(b) : Energie stockée dans le bus continu et sa référence

La tension v_{dc} suit parfaitement sa référence de 48V avec l'observation de quelques dépassements dûs aux grandes variations des puissances (exemple : fort changement de la puissance sollicitée par la charge de 140 à 450W et vice versa, voir figure 4.3). Alors, nous pouvons conclure que le système avec le principe de contrôle proposé s'articule sur la robustesse envers les changements des puissances.

Les figures 4.8.a et 4.8.b prouvent que la tension du stack1 et la quantité de charge stockée sont stabilisées à $v_{ba}(t_f) = 21.8V$ et $Q_{ba}(t_f) = 109C$ après qu'il était soumis au profil du courant indiqué sur la figure 4.7. Ces deux valeurs vérifient bien les relations (3.59) et (3.60) fournies par la commande optimale.

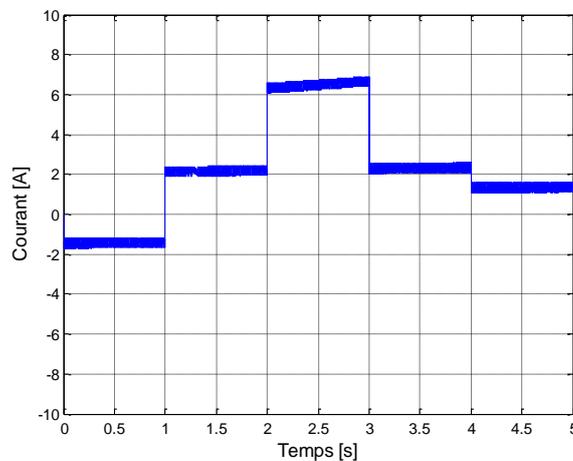


Figure 4.7 : Courant du stack1

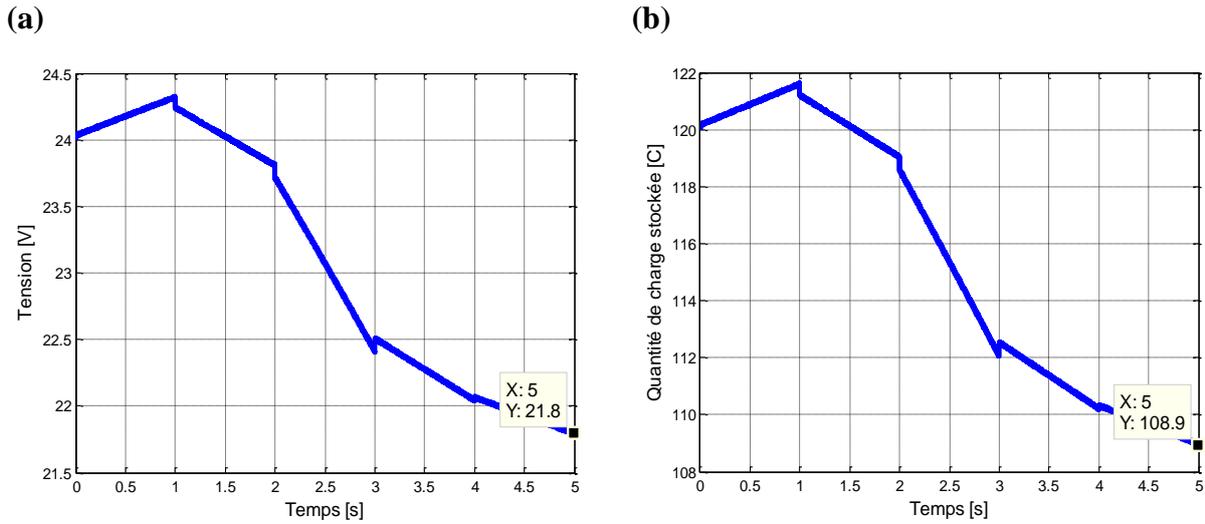


Figure 4.8 : (a) : Tension du stack1 ; (b) : Quantité de charge stockée dans le stack1

Nous pouvons vérifier d'après les équations (3.59) et (3.60) que :

$$v_{ba}(t_f) = \frac{2}{2C_b + 1} Q_{ba}(0) = \frac{2}{2 \times 5 + 1} 120 = 21.8V$$

$$Q_{ba}(t_f) = \frac{2C_b}{2C_b + 1} Q_{ba}(0) = \frac{2 \times 5}{2 \times 5 + 1} 120 = 109C$$

La figure 4.9 démontre que la puissance du stack2 suit parfaitement celle fournie par application de la loi de commande présentée dans l'équation (3.105), expliquant, ainsi, la bonne régulation de la tension v_{dc} à sa référence (voir figure 4.6.a). Nous avons :

$$P_{ba1}(t) = \dot{y}_{dc}(t) = P_{dc}(t) \quad (4.8)$$

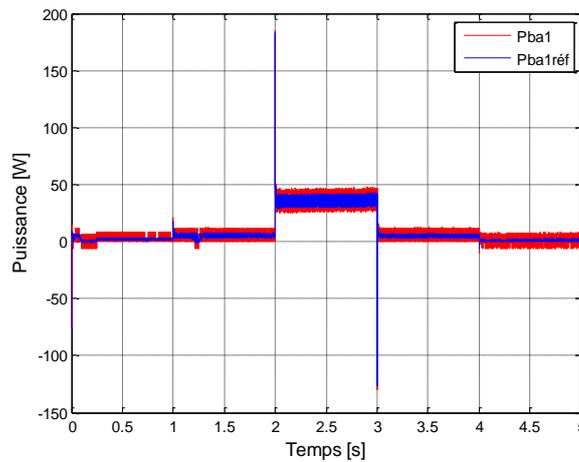


Figure 4.9 : Puissance du stack2 et sa référence

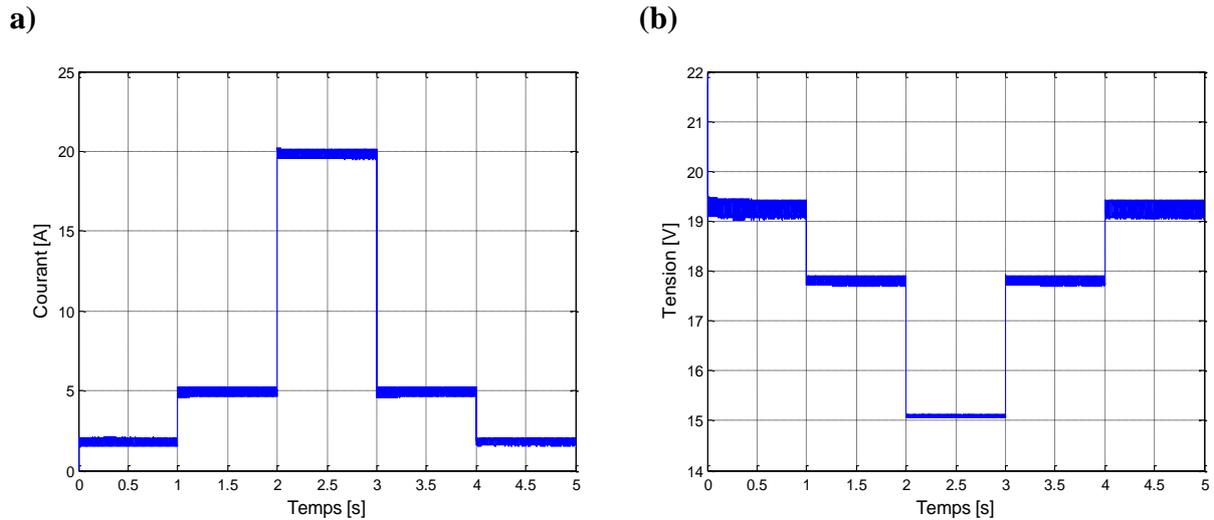


Figure 4.10 : (a) : Courant de la pile ; (b) : Tension de la pile

Les courbes présentées sur les figures 4.10 et 4.11 expliquent les allures des courants et tensions de la pile à combustible et du stack2.

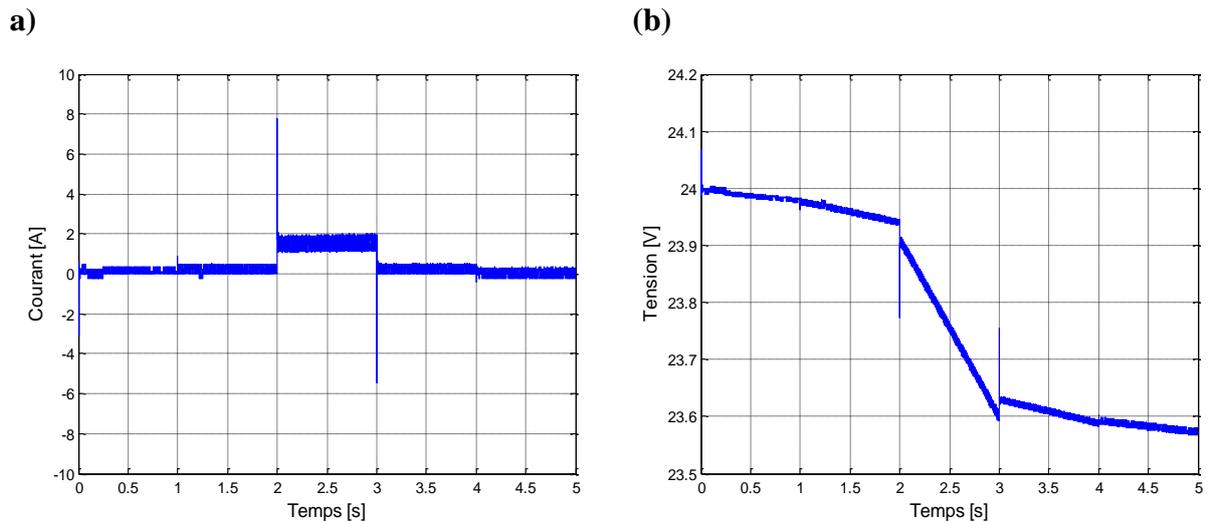


Figure 4.11 : (a) : Courant du stack2 ; (b) : Tension du stack2

C'est ainsi qu'en assemblant les divers résultats, que nous démontrons les hautes performances de la commande optimale/plate optée en vue de la gestion de l'énergie. En fait, quelle que soit la puissance sollicitée :

- ✓ L'alimentation de la charge est garantie,
- ✓ La puissance de la pile à combustible est gardée entre sa valeur minimale et maximale,
- ✓ Le premier stack de batteries assure la fourniture de la différence de puissance entre la pile à combustible et la charge,
- ✓ La tension aux bornes du bus continu est stabilisée à sa valeur de référence,

- ✓ Le premier stack de batteries est préservé pour d'autres cycles de fonctionnement en gardant sa tension finale et quantité de charge stockée dans des valeurs admissibles obtenues par application de la commande optimale.

4.2.2.2. Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présentons la mise en œuvre expérimentale des stratégies optées pour la gestion de l'énergie du système hybride autonome présenté sur la figure 4.2. La mise en œuvre a été effectuée sur un banc expérimental à puissance réduite en fonction de l'équipement disponible au sein du laboratoire MSE.

La pile à combustible 500W du Green a été remplacée par un émulateur composé de l'association « source continue + convertisseur Buck » dans le but d'obtenir une caractéristique « courant-tension » similaire à celle d'une pile à combustible ayant une puissance maximale de 120W et minimale de 0W.

Pour la source continue, elle a été limitée à un courant maximal de 20A, et a été réglée à une tension fixe de 27V.

Les objectifs souhaités dans cette section sont :

- 1) Assurer l'alimentation de la charge,
- 2) Garder la puissance à la sortie de l'émulateur entre sa valeur minimale et maximale,
- 3) Garantir que le stack1 fournit la différence de puissance entre l'émulateur et la charge,
- 4) Maintenir une tension stabilisée aux bornes du bus continu,
- 5) Tenir la tension finale du stack1 à une valeur obtenue par application de la commande optimale.

Pour cela, nous avons créé une Interface Homme-Machine (IHM) qui nous a permis d'accéder à toutes les données et de contrôler en temps réel le fonctionnement du système.

La commande est réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink, puis compilée et implantée numériquement à l'aide d'un système de développement temps réel dSPACE 1104.

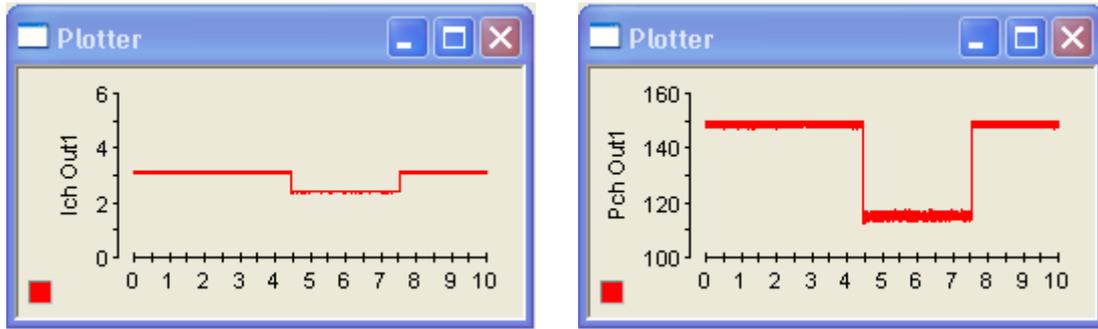


Figure 4.12 : Courant et puissance consommés par la charge tracés dans l'Interface Homme-Machine (IHM) sous Controldesk

En considérant les paramètres du système hybride autonome résumés dans le tableau 4.1, et les profils de consommation ressortissant sur les figures 4.13 et 4.25, les divers résultats sont obtenus en fonction de deux tests.

1) Premier test :

En prenant en compte que la valeur maximale permettant de varier le courant I_{ch} appelé par la charge étant de 25% (selon la charge résistive variable disponible au laboratoire MSE), la variation de I_{ch} est réalisée de la façon suivante :

- Première phase : diminuer I_{ch} de 25% de sa valeur maximale,
- Deuxième phase : augmenter I_{ch} de 25% pour revenir à sa valeur maximale.

Dans ce cas, nous aboutissons aux profils de consommation illustrés sur les figures 4.13 et 4.14.

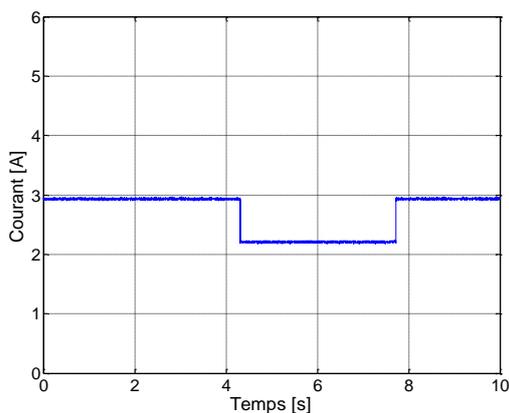


Figure 4.13 : Profil du courant appelé par la charge pour le premier test

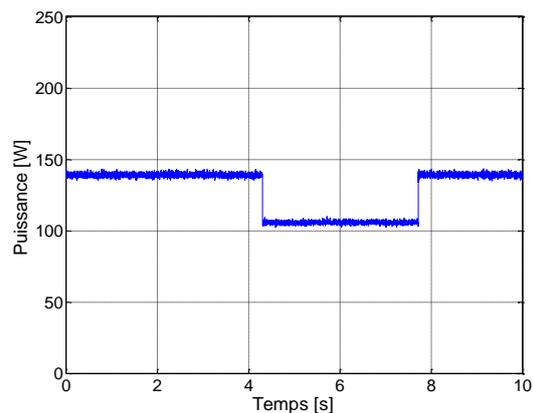


Figure 4.14 : Puissance sollicitée par la charge pour le premier test

Les transferts des puissances dans le système hybride sont, ainsi, exposés sur la figure 4.15.

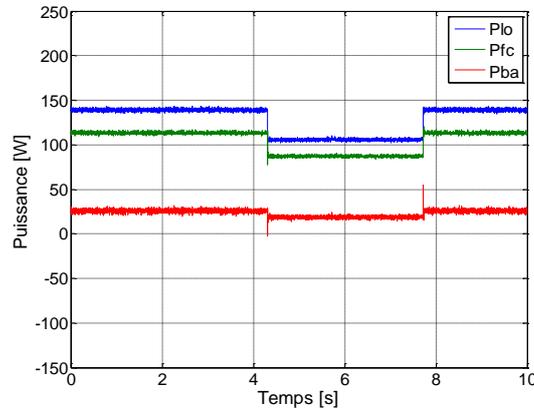


Figure 4.15 : Transferts des puissances pour le premier test

Nous remarquons que la puissance P_{fc} à la sortie de l'émulateur est limitée, tandis que le stack1 fournit la puissance P_{ba} manquante par rapport à celle demandée par la charge. Par conséquent, la contrainte sur la puissance P_{fc} est respectée.

Les allures de la tension v_{dc} du bus continu et l'énergie y_{dc} stockée dans sa capacité apparaissent sur les figures 4.16 et 4.17.

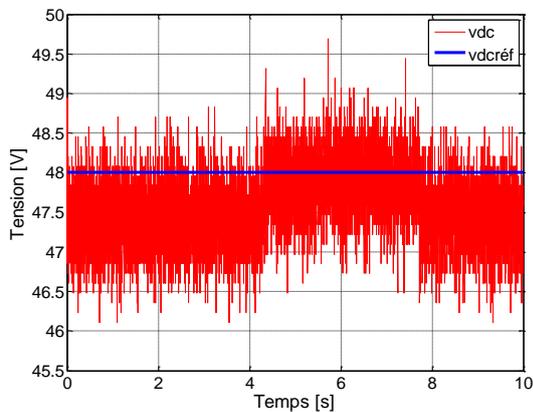


Figure 4.16 : Tension du bus continu et sa référence pour le premier test

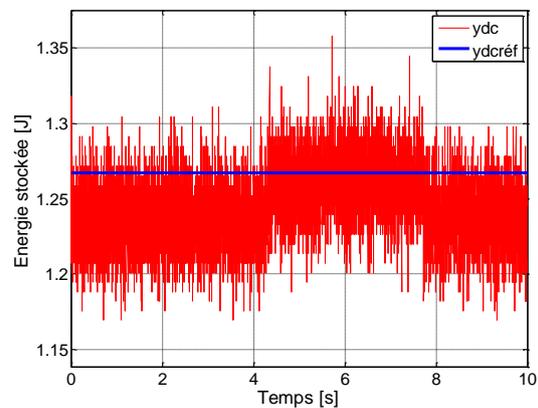


Figure 4.17 : Energie stockée dans le bus continu et sa référence pour le premier test

Nous constatons que v_{dc} et y_{dc} sont régulées à leurs références avec la présence de quelques pics qui restent dans les valeurs admissibles.

Pour le courant et la tension du stack1, ils sont présentés sur les figures 4.18 et 4.19.

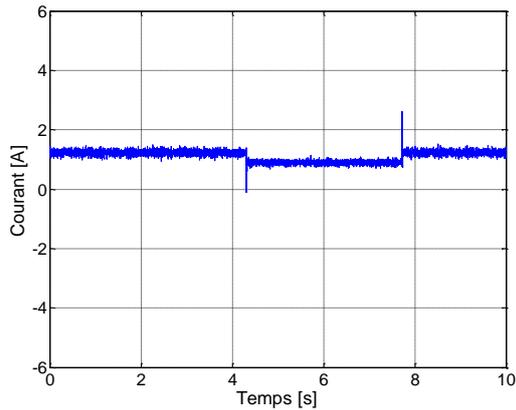


Figure 4.18 : Courant du stack1 pour le premier test

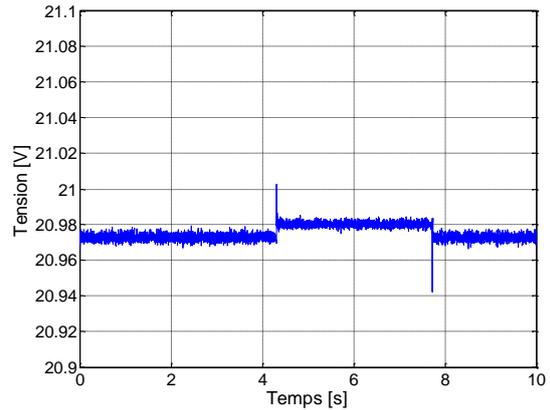


Figure 4.19 : Tension du stack1 pour le premier test

La figure 4.19 prouve que pendant la phase de décharge du stack1 (stack de la technologie "plomb"), il se comporte comme un générateur électrique ayant la tension disponible à ses bornes qui évolue en fonction du courant consommé (voir figure 4.18) du fait de sa résistance interne. Dans le cas présent, le stack n'est pas trop déchargé pour que sa tension chute brutalement.

Sur les figures 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 et 4.24, nous traçons le courant et tension à la sortie de l'émulateur ; puissance, courant et tension du stack2.

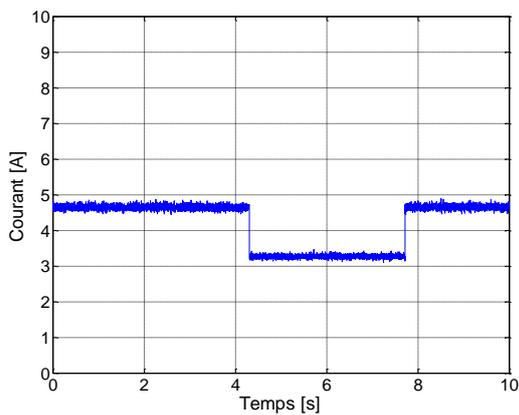


Figure 4.20 : Courant à la sortie de l'émulateur pour le premier test

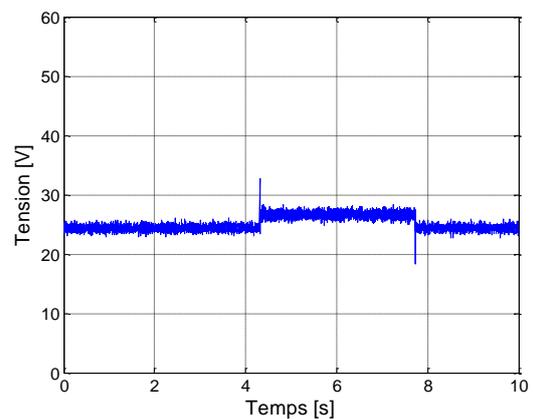


Figure 4.21 : Tension à la sortie de l'émulateur pour le premier test

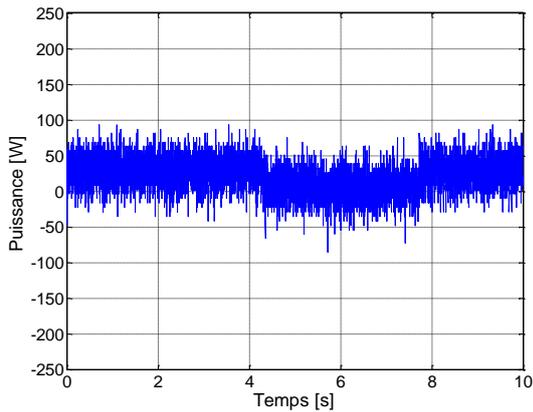


Figure 4.22 : Puissance du stack2 pour le premier test

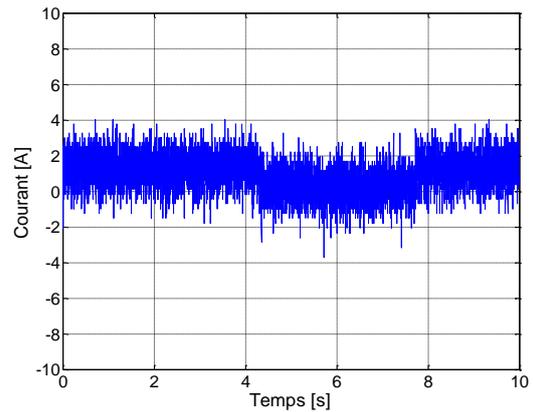


Figure 4.23 : Courant du stack2 pour le premier test

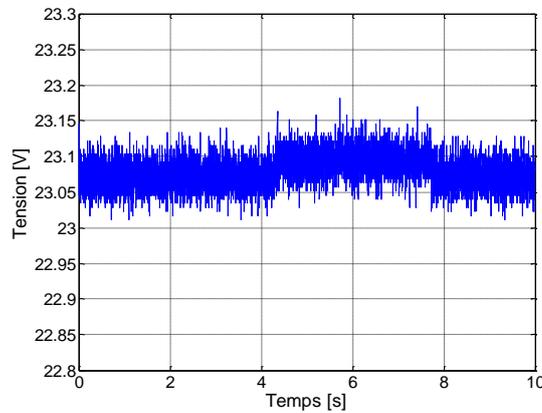


Figure 4.24 : Tension du stack2 pour le premier test

2) Deuxième test :

En gardant les mêmes paramètres du système hybride autonome résumés dans le tableau 4.1, la variation du courant I_{ch} appelé par la charge se traduit comme suit :

- Première phase : augmenter I_{ch} de 25% pour atteindre sa valeur maximale,
- Deuxième phase : diminuer I_{ch} de 25% pour revenir à sa valeur initiale.

Dans ce cas, nous obtiendrons les profils de consommation illustrés sur les figures 4.25 et 4.26.

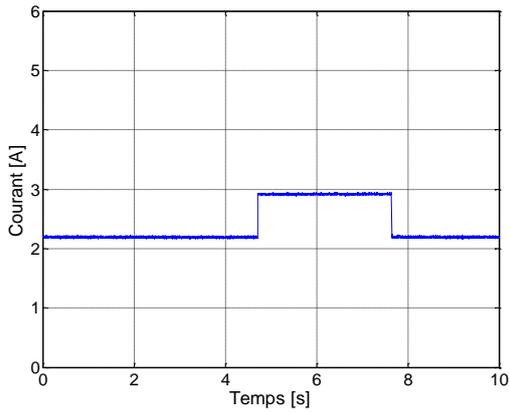


Figure 4.25 : Profil du courant appelé par la charge pour le deuxième test

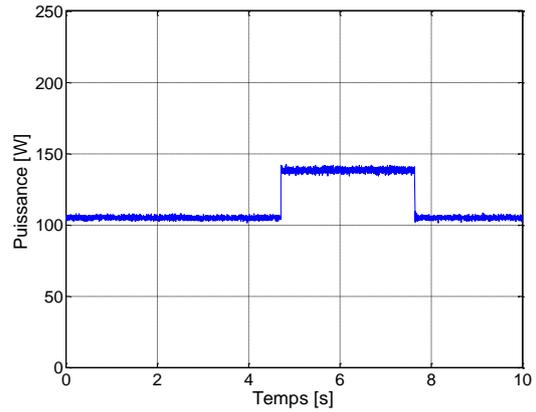


Figure 4.26 : Puissance sollicitée par la charge pour le deuxième test

Sur les figures qui suivent, les allures sont tracées selon l'ordre suivant :

- Transfers des puissances,
- Tension du bus continu et l'énergie stockée dans sa capacité,
- Courant et tension à la sortie de l'émulateur,
- Courant et tension du stack1,
- Puissance, courant et tension du stack2.

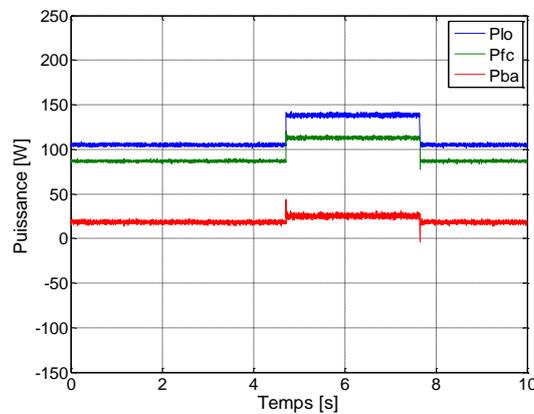


Figure 4.27 : Transferts des puissances pour le deuxième test

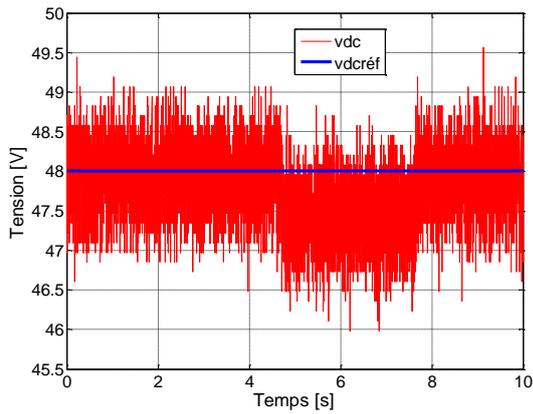


Figure 4.28 : Tension du bus continu et sa référence pour le deuxième test

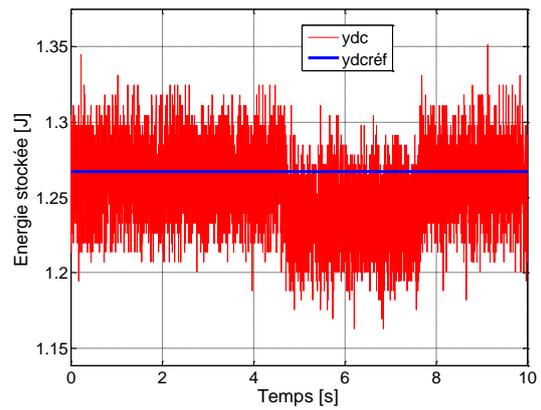


Figure 4.29 : Energie stockée dans le bus continu et sa référence pour le deuxième test

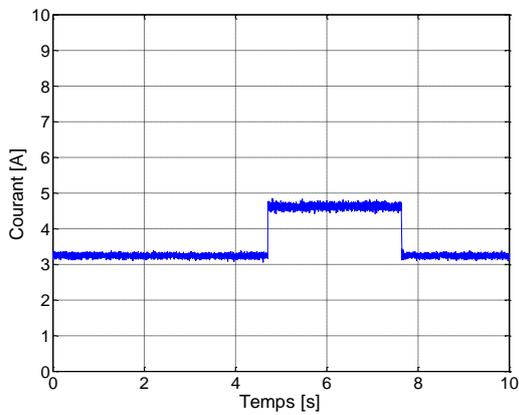


Figure 4.30 : Courant à la sortie de l'émulateur pour le deuxième test

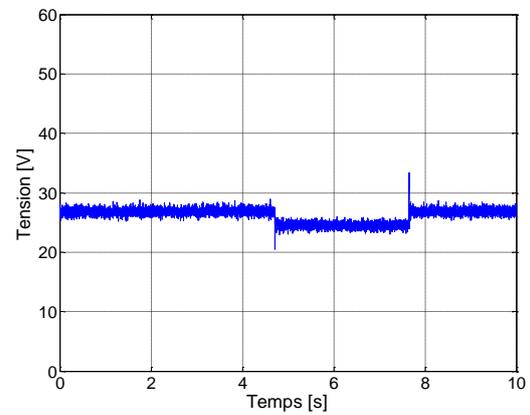


Figure 4.31 : Tension à la sortie de l'émulateur pour le deuxième test

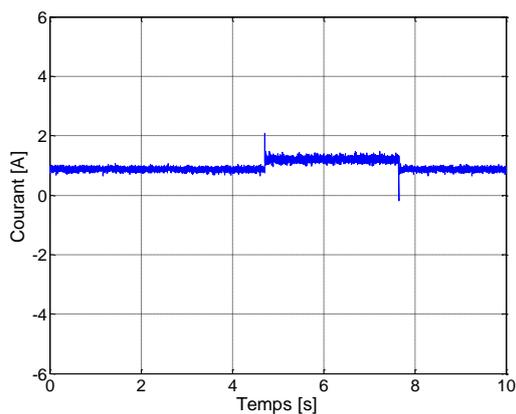


Figure 4.32 : Courant du stack1 pour le deuxième test

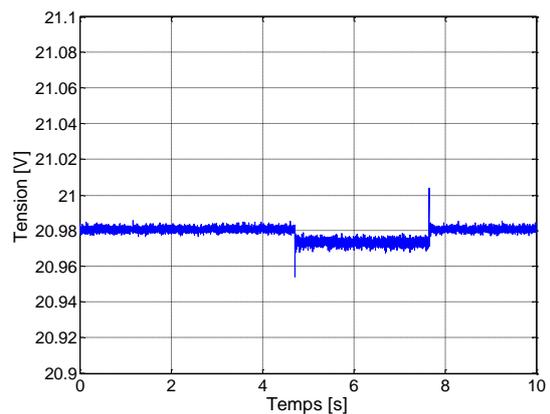


Figure 4.33 : Tension du stack1 pour le deuxième test

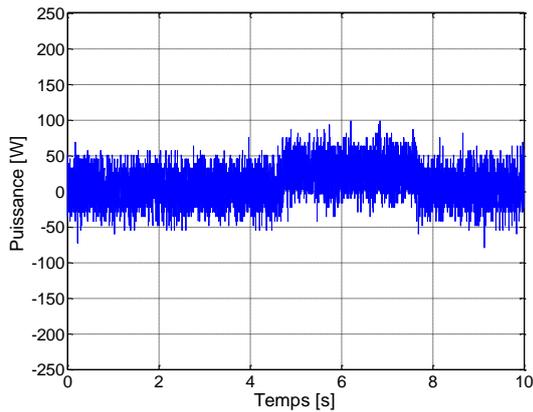


Figure 4.34 : Puissance du stack2 pour le deuxième test

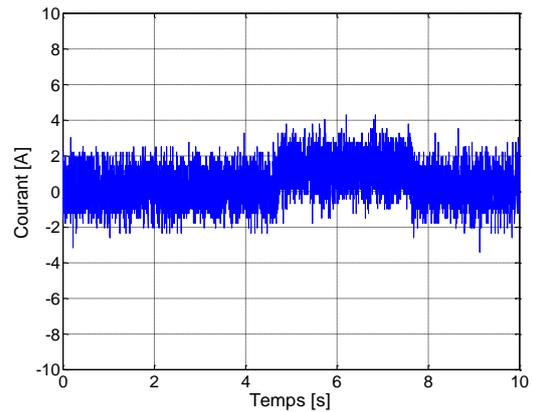


Figure 4.35 : Courant du stack2 pour le deuxième test

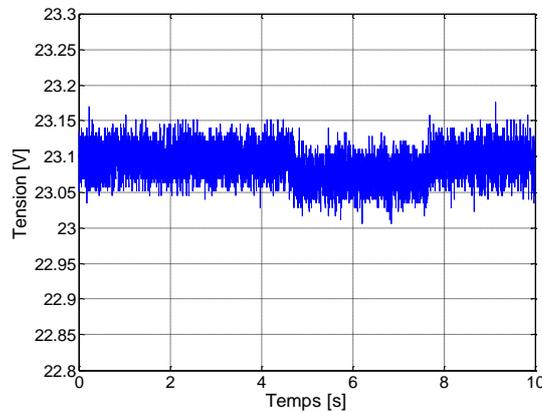


Figure 4.36 : Tension du stack2 pour le deuxième test

À partir des résultats du deuxième test, les conclusions suivantes peuvent être formulées :

- La puissance à la sortie de l'émulateur de la pile à combustible varie entre sa valeur minimale et maximale (voir figure 4.27),
- Le premier stack1 fournit la différence de puissance entre l'émulateur et la charge (voir figure 4.27),
- La tension du bus continu et l'énergie stockée dans sa capacité sont stabilisées à leurs valeurs de référence (voir figures 4.28 et 4.29),
- Les stacks 1 et 2 ne sont pas trop déchargés pour qu'ils deviennent vides (voir figures 4.33 et 4.36).

4.3. Conclusion

Le but du présent chapitre a été de prouver la robustesse et la précision de la commande optimale/plate adoptée pour la gestion énergétique.

Bien que le matériel à notre disposition nous a conduit à procéder à quelques modifications majeures par rapport aux simulations, les résultats obtenus ont permis de valider l'efficacité et la complémentarité entre les stratégies proposées en vue de la gestion de l'énergie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Pour une application « Smart Grid », l'objectif visé dans ce travail de thèse a été d'obtenir des stratégies de commande à la fois efficaces, robustes et précises, permettant une gestion optimale de l'énergie dans un étage hybride d'alimentation électrique totalement autonome composé de trois sources : l'une principale constituée d'un stack de piles à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane), les autres secondaires composées de modules de batteries au lithium-ion et de supercondensateurs. Dans ce volet, la commande optimale/plate a été adoptée, et a permis d'obtenir l'optimum d'énergie en provenance des différents points de production, en tenant compte des contraintes pouvant être subies par ceux-ci.

Les diverses sources d'énergie utilisées jusqu'à lors dans l'architecture d'alimentation sont connectées au bus continu de sortie du système par le biais de trois convertisseurs statiques DC-DC non isolés : l'un Boost connecté aux piles à combustible, les autres Buck/Boost reliés aux stacks de batteries au lithium-ion et de supercondensateurs. Ces convertisseurs ont permis d'assurer les transferts de l'énergie depuis les sources vers la charge, et de réguler la tension du bus continu.

Le développement d'une stratégie de commande hybride a suscité la garantie d'une gestion optimale des flots énergétiques d'une part, et ce à travers un bus continu de tension stabilisée d'autre part. Cette stratégie repose sur l'association des commandes optimale et plate, ayant, pour rôles :

- La génération des trajectoires de référence du courant que doit fournir ou absorber le stack de batteries,
- L'imposition des valeurs des énergies à restituer ou bien à récupérer par le stack de supercondensateurs, dans le but de réguler la tension du bus continu à sa valeur de référence.

Les divers résultats obtenus ont confirmé la validité des stratégies adoptées en vue de la gestion optimale de l'énergie, et ont démontré la complémentarité entre les deux commandes optimale et plate.

Conclusion générale

En fait :

- ✓ L'alimentation de la charge est assurée quelle que soit la puissance sollicitée,
- ✓ Même lors des variations importantes de puissance, les échanges d'énergie entre les sources et la charge sont garantis à travers un bus continu de tension régulée à sa valeur de référence,
- ✓ Les contraintes que peut subir l'architecture hybride durant son fonctionnement sont satisfaites, se traduisant par la limitation de la puissance des piles, et l'admissibilité des valeurs des états de charge finaux des éléments de stockage.

En perspective, il sera intéressant d'orienter le choix des convertisseurs continu-continu d'interface vers ceux à structures isolées. Ces compositions permettront d'assurer à tout moment les échanges des flux énergétiques même en présence de certains types d'anomalies, tels que les courts circuits, les défauts pouvant affectés les semi-conducteurs, etc. Ainsi, seront augmentées la fiabilité et la durée de vie du système hybride piles à combustible qui gardera son autonomie totale.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Capenergies, “La chaîne de valeur du marché des smart grids”, Juin 2012.
- [2] L. Mond and C. Langer. In Proc. Royal Soc., London, Volume: 46, pp. 296-304, 1889.
- [3] M.L. Perry and T.F. Fuller, “A historical perspective of fuel cell technology in the 20th century”, Journal of The Electrochemical Society, Volume: 149, Issue: 7, pp. 59-67, 2002.
- [4] E. Baur and J. Tobler, “Z. Elektrochem. Angew. Phys. Chem.”, Volume: 39, pp. 169-180, 1933.
- [5] F.T. Bacon, “Electrochimica Acta”, Volume: 14, Issue: 7, pp. 569-585, 1969.
- [6] J. M. Grimwood, B. C. Hacker et P. J. Vorzimmer, “Project Gemini Technology and Operations: A Chronology”, NASA SP-4002, 1969.
- [7] Phatiphat Thounthong, “Conception d’une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, 09 Décembre 2005.
- [8] Walid Hankache, “Gestion optimisée de l’énergie électrique d’un groupe électrogène hybride à pile à combustible”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 16 Décembre 2008.
- [9] Jérôme Lachaize, “Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 20 Septembre 2004.
- [10] P. Thounthong, S. Raël et B. Davat, “Conception et réalisation d’un convertisseur statique basse tension pour pile à combustible de type PEM”, EPF’04, Toulouse, France, 15-17 Septembre 2004.
- [11] Hattab Maker, “Optimisation et gestion d’énergie pour un système hybride : association Pile à Combustible et Supercondensateurs”, Thèse de Doctorat de l’Université de Technologie Belfort Montbéliard, 04 Novembre 2008.
- [12] Mahdi Benaouadj, “Contrôle d’une source hybride batteries/supercondensateurs, rechargée par l’énergie photovoltaïque, pour traction électrique « véhicule hybride »”, Mémoire de Magister, Université d’El-Oued, 15 Octobre 2012.
- [13] Thierry Mahé, “Motorisations hybrides : Que faire ?”, Industrie et Technologie, No. 868, pp. 38-41, Mai 2005.
- [14] Louis Brenn, “Avenir du secteur de l’automobile dans un contexte de développement durable : solution durable au moteur à essence”, Essai présenté à l’Université de Sherbrooke, Québec, Canada, Février 2010.

Références bibliographiques

- [15] Rémi Saisset, “Contribution à l’étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 02 Avril 2004.
- [16] Matthieu Urbain, “Modélisation Electrique et Energétique des Accumulateurs Lithium-Ion. Estimation en Ligne du SOC et du SOH”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, 04 Juin 2009.
- [17] Julien Labbé, “l’hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d’électricité pour systèmes photovoltaïques isolés”, Thèse de Doctorat de l’École des Mines de Paris, 21 Décembre 2006.
- [18] Denis Candusso, “Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [19] Farid Belhachemi, “Modélisation et Caractérisation des Supercondensateurs à Couche Double Electrique Utilisés en Electronique de Puissance”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, 19 Décembre 2001.
- [20] Mohamed-Yacine Ayad, “Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, 03 Décembre 2004.
- [21] Boris Berseneff, “Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur”, Thèse de Doctorat de l’Institut Polytechnique de Grenoble, 13 Décembre 2010.
- [22] ADEBT, A. Husson, “Contribution à la réflexion sur la structuration de la filière énergie dans le Nord Franche-Comté”, 09 Mars 2010.
- [23] Julien Monereau, “Smart Grids : Les réseaux électriques intelligents et le cyber sécurité”, ADEC, Juin 2011.
- [24] Rodolphe de beaufort, “Systèmes de Gestion Intelligente de l'Energie : Prendre un temps d'avance sur le futur de l'électricité”, Point de vue et offres de Capgemini.
- [25] Julien Monereau, “Les Smart Grids : Les réseaux électriques du futur : Une première approche”, Version : 2, ADEC, Juin 2011.
- [26] ITEMS International, “La chaîne de valeur du marché des smart grids”, Rapport V52, Juin 2012.
- [27] Union Français de l’Electricité, Rapport du groupe de travail « Réseaux intelligents », Mai 2010.

Références bibliographiques

- [28] Matheepot Phattanasak, “Etude, modélisation et mise en œuvre de convertisseurs DC-DC isolés multiport et modulaires”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 10 Décembre 2012.
- [29] S. V. G. Oliveira, I. Barbi, “A three-phase step-up DC-DC converter with a three-phase high frequency transformer for DC renewable power source applications”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 8, pp. 3567-3580, August 2011.
- [30] P. Thounthong, P. Sethakul, S. Raël, B. Davat, “Modeling and control of a fuel cell current control loop of a 4-phase interleaved step-up converter for DC distributed system”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, pp. 230-236, 15-19 June 2008.
- [31] K. Jin, X. Ruan, M. Yang, M. Xu, “Power management for fuel-cell power system cold start”, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 24, No. 10, pp. 2391-2395, October 2009.
- [32] B. Huang, A. Shahin, J.P. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, “High voltage ratio non-isolated DC-DC converter for fuel cell power source applications”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, pp. 1277-1283, 15-19 June 2008.
- [33] Akassewa Tchapo Singo, “Système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, 03 Février 2010.
- [34] Ramzi Saadi, “Convertisseurs basse tension (42V, 540V) ; application source hybride utilisant une pile à combustible”, Thèse de Doctorat de l’Université de Biskra, 11 Mars 2015.
- [35] M. Benaouadj, A. Aboubou, M.Y. Ayad, M. Becherif, “Nonlinear Flatness Control Applied to Supercapacitors Contribution in Hybrid Power Systems using Photovoltaic Source and Batteries”, Energy Procedia 50 (2014), pp. 333-341, 2014.
- [36] M. Benaouadj, M.Y. Ayad, M. Becherif, A. Aboubou, M. Bahri and O. Akhrif, “Nonlinear Flatness Control Applied for Energy Management of PV/Batteries/Supercapacitors Hybrid Power Sources for Stand-Alone Applications”, 3rd International Conference on Systems and Control (ICSC’13), Algiers, Algeria, pp. 739-744, 29-31 October 2013.
- [37] M. Benaouadj, M.Y. Ayad, M. Becherif, A. Aboubou, M. Bahri and O. Akhrif, “Energy Flow Control of Wind/PV/Batteries/Supercapacitors Autonomous Hybrid Power Sources using the Flatness Concept”, 3rd International Conference on Systems and Control (ICSC’13), Algiers, Algeria, pp. 1110-1115, 29-31 October 2013.
- [38] M. Y. Ayad, M. Becherif, A. Aboubou and A. Henni, “Sliding Mode Control of Fuel Cell, Supercapacitors and Batteries Hybrid Sources for Vehicle Applications”, InTech, ISBN: 978-953-307-162-6, pp. 87-109, 2011.

Références bibliographiques

- [39] P. Barrade, A. Rufer, “The use of supercapacitors for energy storage in traction systems”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, 06-08 October 2004.
- [40] Jean-Paul Ferrieux, François Forest, “Alimentations à découpage Convertisseurs à résonance, Principes, composants et modélisation”, Edition : Dunod, 3e édition, ISBN : 2100505395, 2006.
- [41] Amel Lachichi, “Modélisation et stabilité d’un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible”, Thèse de Doctorat de l’Université de Franche-Comté, 24 Novembre 2005.
- [42] Fuel Cell Handbook, 7th Edition, EG&G Technical Services, Inc., November 2004.
- [43] James Larminie, Andrew Dicks, “Fuel Cell Systems Explained”, 2nd Edition, ISBN: 978-0-470-84857-9, February 2003.
- [44] Maamir Madiha, “Gestion d’énergie d’un système d’entraînement électrique hybride basé sur un moteur synchrone à aimants permanents”, Mémoire de Magister de l’Université de Biskra, 2014.
- [45] M.Y. Ayad, M. Becherif, D. Paire, A. Djerdir, A. Miraoui, “Passivity-Based Control of Hybrid Power Sources using Fuel Cell, Supercapacitors, and Batteries on the DC link for Energy Traction System”, IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC '07), Antalya, Turkey, Volume: 1, pp. 453-458, 03-05 May 2007.
- [46] Ahmed Neffati, “Stratégies de gestion de l’énergie électrique d’un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride”, Thèse de Doctorat de Université de Toulouse III Paul Sabatier, 11 Avril 2013.
- [47] L. Pontriaguine, V. Boltianski, G. Gamkrelidze, and E. Michtchenko, “Théorie Mathématique des Processus Optimaux”, Edition Mir, Moscou, 1974.
- [48] Khellafi Louardi, “Modélisation, optimisation et gestion énergétique de l’étage d’alimentation dans les véhicules électriques hybrides”, Thèse de Magister de l’Université de Batna, 28 Juin 2012.
- [49] Saida Kermani, “Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel”, Thèse de Doctorat de l’Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 17 Septembre 2009.
- [50] H. Abou-Kandil, “La commande optimale des systèmes dynamiques”, Hermès Science, 2004.
- [51] M. Benaouadj, M.Y. Ayad, M. Becherif, A. Aboubou and M. Bahri, “Control Alghorithm of Fuel Cell Hybrid Source Based on the Flatness Propriety”, 3rd International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA’ 14), Paris, France, 19-21 November 2014.

Références bibliographiques

- [52] M. Aimene, A. Payman and B. Dakyo, “Commande par platitude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable connecté au réseau”, Symposium de Génie Electrique : EF-EPF-MGE 2014, ENS Cachan, France, 8-10 Juillet 2014.
- [53] M. Benaouadj, A. Aboubou, R. Saadi, M.Y. Ayad, M. Becherif, M. Bahri, O. Akhrif, “Flatness control of batteries/supercapacitors hybrid sources for electric traction”, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2013), Istanbul, Turkey, pp. 141-146, 13-17 May 2013.
- [54] R. Saadi, M. Benaouadj, O. Kraa, M. Becherif, M.Y. Ayad, A. Aboubou, M. Bahri, A. Haddi, “Energy Management of Fuel Cell/Supercapacitors Hybrid Power Source Based on the Flatness Control”, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2013), Istanbul, Turkey, pp. 128-133, 13-17 May 2013.
- [55] M. Benaouadj, A. Aboubou, M.Y. Ayad, M. Becherif, “Flatness Control Applied to Batteries/Supercapacitors Hybrid Sources for Electric Vehicle Application”, 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE'12), Algiers, Algeria, 7-9 May 2012.
- [56] A.E.M. Shahin, “Contribution à l'optimisation des structures de conversion DC/DC non isolées”, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 2011.
- [57] Magid Zandi, “Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique”, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 12 Novembre 2010.
- [58] Alireza Payman, “Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources Multi-charges”, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 15 Juillet 2009.
- [59] M. J. Van Nieuwstadt and R. M. Murray, “Real-time trajectory generation for differentially flat systems”, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 8, No. 11, pp. 995-1020, September 1998.
- [60] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon, “Flatness and defect of non-linear systems: Introductory theory and examples”, International Journal of Control, Vol. 61, No. 6, pp. 1327-1361, 1995.
- [61] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin et P. Rouchon, “Sur les systèmes non linéaires différentiellement plats”, C. R. Acad. Sciences, Série : 1, Volume : 315, pp. 619-624, 1992.

Références bibliographiques

- [62] M. Aimene, A. Payman and B. Dakyo, “Flatness-based Control of a Variable-Speed Wind-Energy System Connected to the Grid”, 9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER’14), Monaco, France, pp. 1-7, 25-27 March 2014.
- [63] A. Houari, H. Renaudineau, J-P. Martin, S. Pierfederici and F. Meibody-Tabar, “Flatness-Based Control of Three-Phase Inverter With Output LC Filter”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 7, July 2012.
- [64] H. Alhamed Aldwaihi and E. Delaleau, “Maximum Power Point Tracker of a Wind Generator Based on The Flatness-Based Control”, 3rd Annual IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2011), Phoenix, AZ, USA, pp. 883-888, 17-22 September 2011.
- [65] Phatiphat Thounthong, Serge Pierfederici, Jean-Philippe Martin, Melika Hinaje, Bernard Davat, “Modeling and Control of Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Source Based on Differential Flatness Control”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, pp. 2700-2710, July 2010.
- [66] J. Dannehl, and F.W. Fuchs, “Flatness-Based Control of an Induction Machine Fed via Voltage Source Inverter-Concept, Control Design and Performance Analysis”, 32nd Annual IEEE Industrial Electronics Conference (IECON’06), Paris, France, pp. 5125-5130, 6-10 November 2006.
- [67] E. Delaleau, A.M. Stankovic’, “Flatness-based hierarchical control of the PM synchronous motor”, American Control Conference, Boston, MA, USA, Vol. 1, pp. 65-70, June 30-July 2, 2004.
- [68] E. Delaleau, J-P. Louis, R. Ortega, “Modeling and Control of Induction Motors”, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol. 11, No. 1, pp. 105-129, 2001.
- [69] Azeddine Houari, “Contribution à l’étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 07 Décembre 2012.
- [70] Phatiphat Thounthong, Stephane Raël, Bernard Davat, “Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications”, Journal of Power Sources, Vol. 193, pp. 376-385, 2009.