

Étude systémique pour l'alimentation hybride – application aux systèmes intermittents

THÈSE N° 5768 (2013)

PRÉSENTÉE LE 12 JUILLET 2013

À LA FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR
LABORATOIRE D'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE
PROGRAMME DOCTORAL EN ENERGIE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Simon DELALAY

acceptée sur proposition du jury:

Prof. J. A. Schiffmann, président du jury
Prof. A. Rufer, directeur de thèse
Prof. A. Bouscayrol, rapporteur
Prof. M. Paolone, rapporteur
Prof. J.-M. Vinassa, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2013

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, les choix directeurs dans le domaine de l'approvisionnement énergétique reflètent une volonté de se reposer de plus en plus sur les énergies renouvelables. Cependant, pour la génération électrique, un tel choix n'est pas sans conséquences sur la gestion des ressources. Le remplacement de sources d'énergies contrôlables par de sources à comportement stochastique soulève des questions quant à la continuité de l'approvisionnement. Pour y répondre, une des solutions implique la mise en place de systèmes de stockage de l'énergie.

A l'image de cet exemple, l'usage d'accumulateurs d'énergie est de plus en plus courant, ne serait-ce que pour satisfaire nos besoins croissants de mobilité. L'usage de ces éléments sous-entend aussi des transferts rapides d'énergie entre les sources, par exemple lors de la recharge de ces derniers.

C'est dans cette thématique que souhaite s'ancrer ce travail, où l'on s'intéresse au comportement des sources d'énergie à fonctionnement intermittent, souvent associées aux systèmes de stockage de l'énergie. Ainsi, le développement se focalise dans un premier temps sur l'échange d'énergie entre deux sources. Les outils nécessaires à la caractérisation du transfert énergétique sont introduits et le rendement de ce dernier est mis en évidence.

Pour résoudre les problèmes liés à l'alimentation classique d'une charge intermittente, l'intérêt se porte ensuite sur l'usage de systèmes multi-sources — hybrides. Les nombreux degrés de liberté proposés par ces derniers sont mis en évidence, et une classification générique des systèmes hybrides est proposée. En guise d'exemple, le dimensionnement d'un système hybride électrique est étudié. Lors de ce cas d'application, l'accent est mis sur le transfert rapide d'énergie entre deux accumulateurs. Etant donné la forte sollicitation des accumulateurs, le dimensionnement de ces derniers s'avère être une étape clé.

Afin de généraliser la problématique de la charge rapide, la dernière partie de ce travail se focalise sur l'alimentation de systèmes intermittents. Après avoir relevé plusieurs solutions pour l'alimentation de ces derniers, deux systèmes à stockage intermédiaire sont retenus pour l'alimentation des systèmes fortement intermittents à basse fréquence. Ces derniers sont modélisés, leur rendement évalué ; des considérations sur le dimensionnement des étages de stockage sont formulées. La notion d'amplification de puissance est introduite ; en effet, grâce à ce dispositif, l'alimentation d'une charge intermittente à forte puissance peut être réalisée à partir d'une source d'énergie faible puissance.

Finalement, à titre d'exemple, un système bi-étagé d'alimentation à stockage intermédiaire est mis en place afin de valider l'approche. A l'aide de ce dispositif, on souhaite établir un transfert d'énergie entre une source et une charge *a priori* incompatibles.

MOTS-CLÉ : stockage d'énergie, rendement énergétique, systèmes intermittents, systèmes hybrides, amplification de puissance, transfert rapide d'énergie, charge rapide.

ABSTRACT

Nowadays most of the decisions in the field of energy supply lead to an increased use of renewable energy resources. Such decisions imply several consequences for instance in electrical power generation. Indeed, replacing conventional energy sources by more stochastic ones has many impacts on the energy resources management. Guaranteeing an uninterrupted power flow to the consumer tends to be harder due to sudden changes of the power balance. A response can be found in adding several storage units within the power grid.

As a matter of fact, energy storage systems have received a growing interest in the last few years. Consequently, the use of energy storage systems involves and requires fast energy transfers such as during the charge of a battery.

This latter issue is the key point of the present work whose focus will be set on intermittent energy sources, which are tightly linked with the use of energy storage devices. First of all, several tools will be developed in order to characterize the energy transfer between two energy sources. These ones will highlight efficiency of powering several kind of loads.

In order to solve the issues related to conventional power supplies, the focus will be set on systems made of several types of energy sources — or hybrid systems. The degrees of freedom of such solutions will be underlined and a classification of hybrid systems will be proposed. In order to illustrate the use of hybrid power supplies, an example will be studied and its sizing will be emphasized. Within that specific case, a fast energy transfer will be investigated. Being given the high level of solicitation of energy storage units, this energy transfer turns out to be the key point of the development.

In order to generalize the comments on the fast energy transfer, the scope will be set on the power supply of intermittent loads. Several solutions for the power supply of such loads will be commented. A new approach with embedded storage will be proposed for powering highly intermittent loads at low frequency. This system will be investigated and modelled during the last part of this work.

An experimental validation of a two-stage power supply with embedded storage will be set up. This latter will interface a low power source with a high power load. Although this connexion seems to be impossible, the experimental set-up will demonstrate that the two-stage power supply allows interfacing such systems. Finally, a power amplification ratio will be introduced, which illustrates the capability of the system to generate a much higher power than its power supply is able to provide.

KEYWORDS : energy storage, efficiency, intermittent loads, hybrid systems, power amplification, fast energy transfer, fast charge.

*Il s'agirait de voir jusqu'à quel point vont aller nos pouvoirs,
à nous les hommes,
car ils augmentent sans cesse,
tandis que ceux de la nature diminuent d'autant.*

— C. F. Ramuz, "Questions"

REMERCIEMENTS

Ce présent document matérialise plusieurs années de travail durant lesquelles le concours, direct ou indirect, de plusieurs personnes a joué un rôle déterminant. Par ces quelques lignes, je tiens à remercier ces estimées contributions.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord au Prof. Alfred Rufer, directeur du Laboratoire d'électronique industrielle (LEI) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), qui m'a accordé sa confiance tout d'abord en me permettant de rejoindre son équipe, puis par la grande autonomie, parsemée de judicieux conseils et idées, qu'il m'a accordée. Le LEI est un laboratoire d'exception à plusieurs titres : premièrement de par les compétences des personnes qui l'animent et qui l'ont animé, mais aussi de par l'esprit de famille qui y règne, à mille lieues des tendances actuelles au sein du monde académique. Ma reconnaissance va à la Commission pour la technologie et l'innovation (CTI) pour son soutien généreux via les deux collaborations industrielles sur lesquelles se reposent ce travail, avec les sociétés Logitech SA et Hymexia Sàrl.

Merci aux membres du jury, Prof. Jürg Schiffman, Prof. Mario Paolone, Prof. Alain Bouscayrol et Prof. Jean-Michel Vinassa, pour le regard critique qu'ils ont porté sur ce document ainsi que les commentaires constructifs qui ont permis l'amélioration de ce dernier.

Tout ma gratitude va à mes collègues passés et présents du laboratoire. En premier lieu, mes remerciements vont à mon collègue de bureau Dr. Philippe Barrade, premier assistant du laboratoire et personnage haut en couleur. Même si officiellement il n'a que peu de liens directs avec mon travail, je souhaite lui exprimer ici tous mes plus sincères et amicaux remerciements, tant nos discussions, débats et commentaires incessants ont permis d'éclairer mes pas sur le chemin de la thèse (et bien au-delà...). Merci à mes collègues et amis Nicolas Cherix, Christian Rod, Arnaud Leuba, Yves Birbaum et Phillippe Barrade (encore !) avec lesquels j'ai eu le plaisir et la chance de passer du temps, entre autres sur notre projet 'BoomBox' dont le développement est toujours d'actualité. Ces personnes conjuguent une rare compétence avec une gentillesse sans autre pareille. Un clin d'oeil va aussi vers tous les gens (doctorants, post-doc, apprentis, etc.) qui ont contribué à rendre la vie au laboratoire plus agréable : Sébastien, Yannick, Michail, Stephan, Antoine, Behrooz, Gael, Stéphane, Fabienne, Fred, Endika, Asier, Hardi, Mahbod, Gina, Roberto, Maria,...

Je souhaite remercier les services techniques de l'école et notamment les ateliers de circuits imprimés et d'électromécanique, dirigés par Phillippe Vosseler et Jean-Paul Brugger. Trop souvent oubliées, ces entités et leur personnel, disponible et compétent,

sont nécessaires afin de permettre aux différents laboratoires de cette école de continuer à franchir le pas du numérique vers le monde réel.

Finalement, je transmets toute ma reconnaissance à mes amis, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au succès de mes études doctorales et surtout à ma famille, au sens large du terme ; en plus de m'avoir inconditionnellement soutenu et encouragé durant ces longues années, beaucoup ont contribué aux relectures intensives de ce document. Merci !

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	iii
Abstract	v
Remerciements	vii
I INTRODUCTION	1
1 MISE EN CONTEXTE ET DÉFINITIONS	3
1.1 Génération électrique via les énergies renouvelables	5
1.2 Problématiques induites	6
1.2.1 Intermittence des sources d'énergie sur le réseau électrique	6
1.2.2 Non-adéquation génération/consommation	7
1.2.3 Conséquences	8
1.3 Stockage d'énergie	9
1.3.1 Formes de stockage de l'énergie électrique	10
1.3.2 Systèmes à stockage multiple ou systèmes hybrides	12
1.4 Objectifs de ce travail	13
1.5 Synthèse et structure du document	13
II OUTILS ET MÉTHODES DE LA GESTION ÉNERGÉTIQUE	15
2 SOURCES D'ÉNERGIE, CHARGES ET ALIMENTATION	17
2.1 Objectifs	17
2.2 Définitions	17
2.2.1 Énergie	18
2.2.2 Puissance	18
2.2.3 Source d'énergie	19
2.3 Classification et propriétés des sources d'énergie	23
2.3.1 Forme d'interface	23
2.3.2 Flux d'énergie	24
2.3.3 Forme de la variable imposée	24
2.3.4 Réponse temporelle	25
2.4 Association de deux sources d'énergie	26
2.4.1 Forme de l'énergie	26
2.4.2 Flux d'énergie	26
2.4.3 Forme de la variable imposée	27
2.4.4 Réponse temporelle	27
2.5 Alimentation de charges usuelles	27
2.5.1 Modélisation de contraintes en puissance	28
2.5.2 Critères de dimensionnement d'alimentation	30
2.6 Accumulateurs, énergie et alimentation	31
2.6.1 Diagramme de Ragone	31
2.6.2 Modèle d'accumulateur de type électrique	33
2.6.3 Représentation de l'énergie disponible	36
2.6.4 Commentaires sur l'impact de la sollicitation en énergie	40
2.7 Alimentation de systèmes réels	40
2.7.1 Sur-dimensionnement	40
2.7.2 Non-réversibilité des flux d'énergie	41
2.8 Synthèse	42

III	STOCKAGE HYBRIDE	45
3	STOCKAGE HYBRIDE	47
3.1	Objectifs	47
3.2	Définition des systèmes hybrides	47
3.2.1	Composition des sources	49
3.3	De l'alimentation directe au système hybride	49
3.3.1	Directions des flux d'énergie	50
3.3.2	Connexion des sources	52
3.3.3	Contraintes topologiques des flux d'énergie	52
3.4	Classification des systèmes hybrides	54
3.4.1	Energétique	55
3.4.2	Spectrale	55
3.4.3	Redondance	56
3.4.4	Versatilité	56
3.4.5	Multiple	56
3.5	Choix des accumulateurs et notions de dimensionnement	56
3.5.1	Energétique	57
3.5.2	Spectrale	59
3.5.3	Redondance	60
3.5.4	Versatilité	61
3.6	Synthèse	61
4	CAS D'APPLICATION : ACCUMULATEUR LI-ION/SUPERCONDENSATEUR	63
4.1	Objectifs	63
4.2	Cahier des charges	64
4.3	Accumulateur hybride	65
4.3.1	Identification de la fonctionnalité recherchée	66
4.3.2	Choix des accumulateurs	66
4.3.3	Combinaison des accumulateurs	67
4.3.4	Alimentation de l'application et commande	68
4.4	Charge rapide	69
4.4.1	Charge du supercondensateur	70
4.4.2	Alimentation en énergie	74
4.4.3	Définition du convertisseur de charge rapide	76
4.4.4	Considérations sur le rendement	80
4.5	Représentation et dimensionnement du système	83
4.5.1	REM et SMC	85
4.5.2	Stratégie	85
4.5.3	Dimensionnement énergétique de l'accumulateur hybride	87
4.5.4	Dimensionnement énergétique de l'accumulateur du chargeur	90
4.5.5	Temps de transfert	91
4.6	Validation expérimentale	92
4.6.1	Composants et accumulateurs	92
4.6.2	Chargeur rapide	92
4.6.3	Charge rapide — rendement global	95
4.7	Synthèse	96
4.7.1	Prototype final	97
IV	ADAPTATION DE PUISSANCE	99
5	GÉNÉRALISATION DE LA RECHARGE RAPIDE	101
5.1	Contexte	101

5.2	Objectifs	101
5.3	Alimentation d'une charge intermittente	102
5.3.1	Définition de la charge intermittente	102
5.3.2	Méthodes d'alimentation des charges intermittentes	103
5.4	Classification et solutions	106
5.5	Alimentation par stockage intermédiaire	107
5.5.1	Définitions et hypothèses de travail	107
5.5.2	Système mono-étagé	108
5.5.3	Système bi-étagé	112
5.6	Dimensionnement des accumulateurs	117
5.6.1	Système mono-étagé	118
5.6.2	Système bi-étagé	119
5.7	Synthèse	120
6	AMPLIFICATION DE PUISSANCE	123
6.1	Objectifs	123
6.2	Description du système	123
6.2.1	Définition de l'étage d'alimentation de la charge	124
6.2.2	Définition de la source	125
6.2.3	Système complet	129
6.2.4	Représentation et structure de commande	130
6.3	Considérations sur le rendement	132
6.3.1	Système photovoltaïque	132
6.3.2	Système hydropneumatique	132
6.4	Validation expérimentale	133
6.5	Synthèse	136
V	CONCLUSION	137
7	CONCLUSION GÉNÉRALE	139
7.1	Résumé	139
7.2	Résultats et contributions	140
7.3	Perspectives	142
VI	ANNEXES	145
A	REPRÉSENTATION ÉNERGÉTIQUE MACROSCOPIQUE (REM)	147
A.1	Présentation	147
A.2	Blocs de base	148
A.3	Inversion et structure maximale de commande	148
B	MODÈLE DE PERTES DU CONVERTISSEUR DE CHARGE RAPIDE	151
B.1	Pertes du convertisseur	151
B.2	Pertes de l'inductance	154
B.3	Pertes dans les accumulateurs	154
	BIBLIOGRAPHIE	157
	LISTE DES SYMBOLES	161
	LISTE DES FIGURES	162
	LISTE DES TABLEAUX	167
	CURRICULUM VITAE	169

Première partie

INTRODUCTION

MISE EN CONTEXTE ET DÉFINITIONS

Alors que le XX^{ème} siècle peut être considéré comme celui qui a vu la consommation d'énergie croître de manière exponentielle, les années à venir vont se dessiner comme celles où le rapport de l'humain à l'énergie va fondamentalement changer. En effet, les projections de l'accroissement démographique, de la consommation énergétique et des réserves d'énergie laissent entrevoir nombre de problèmes d'approvisionnement en énergie à moyen terme [1, 2, 3].

Ainsi, avec une consommation mondiale d'énergie qui a presque doublé en quatre décennies (figure 1.1) apparaît le besoin urgent de changer le rapport Homme-énergie. Plusieurs axes d'intervention peuvent être retenus :

- une utilisation plus rationnelle de l'énergie ;
- des progrès dans le rendement énergétique des systèmes ;
- un approvisionnement d'énergie de type renouvelable (par opposition à l'usage extensif des sources d'énergie fossile) .

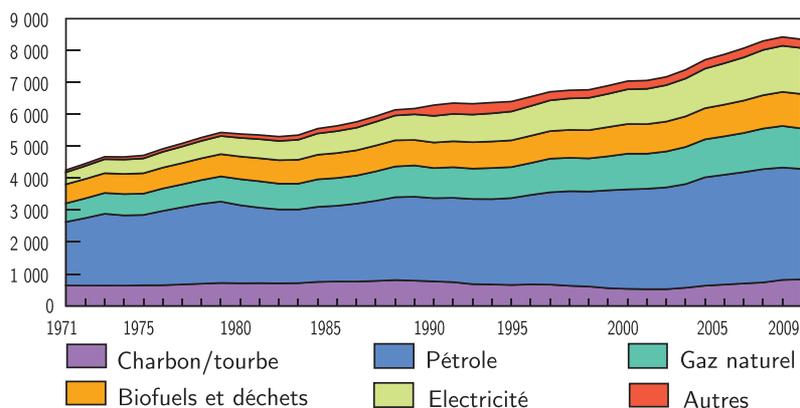


FIGURE 1.1 : Consommation mondiale d'énergie de 1971 à 2009 en Mtep [4]



FIGURE 1.2 : Sortie délicate du nucléaire, par Chappatte

La première piste a pour objectif une réduction de la consommation de l'énergie globale ; cette dernière implique une remise en question des réels besoins en énergie des individus : autonomie, mobilité, chauffage... Cette voie implique principalement un changement de comportement des individus et du groupe, comme le proposent les initiatives du type *société 2000W* [5].

Le second axe, qui consiste en l'amélioration des systèmes énergétiques actuels, a déjà été abordé depuis quelques années. En guise d'exemple, depuis 1992 en Europe, une politique visant à l'encouragement d'appareils électroménagers à bon rendement énergétique a été mise en place par le biais des étiquettes-énergie (92/75/CEE). Cependant, pour être efficace, ce principe d'incitation à l'économie doit être étendu à toutes les disciplines ayant trait à l'énergie.

Le troisième axe proposé ne vise pas directement la réduction de la consommation énergétique, mais l'encouragement de l'usage des énergies propres et renouvelables. Dans une vision à moyen long terme, ce dernier volet est primordial, dans le sens où les réserves de combustibles fossile et fissile sont à durée et surtout à quantité limitées ; dans l'hypothèse où la croissance de la consommation énergétique garde la tendance actuelle, avec une exploitation par des technologies conventionnelles, les réserves estimées font état d'environ 50 ans de réserves de pétrole conventionnel, 60 ans de gaz naturel, 100 ans d'uranium, etc. [6] Une fois ces ressources épuisées, la totalité de l'énergie électrique devra être générée par des sources renouvelables.

Ce dernier axe de gestion de l'énergie a été rendu d'autant plus important depuis la période post-Fukushima, notamment en Europe centrale et au Japon. En effet, au-delà des conséquences environnementales de cet accident, cette crise majeure a jeté nombre de doutes quant au bien fondé, qui était alors acquis, de la génération d'électricité par le biais de la filière nucléaire. En plus des problématiques inhérentes à la production du combustible et à la gestion des déchets radioactifs, cette dernière a été notamment

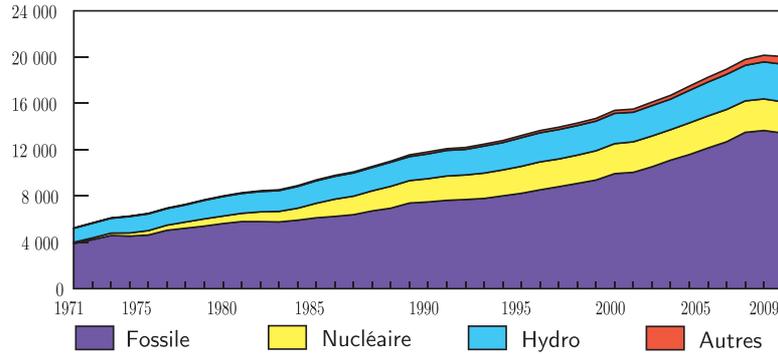


FIGURE 1.3 : Production mondiale d'électricité de 1971 à 2009 en TWh [4]

critiquée pour son manque de transparence sur le plan de la sécurité. Plusieurs décisions émanant de pays principalement d'Europe centrale (Suisse, Italie, Allemagne) mais aussi du Japon vont dans le sens d'un abandon progressif du nucléaire [7].

Ainsi, d'une part, la production mondiale d'électricité par les filières fossiles de 67.1% (figure 1.3) devra, à moyen terme, être remplacée par des sources d'énergie renouvelables. A cela s'ajoute une réflexion sur l'avenir du nucléaire, qui se traduit déjà aujourd'hui en souhait d'abandonner cette énergie, de laquelle est issue une grande part de l'électricité générée, pour des sources plus propres.

1.1 GÉNÉRATION ÉLECTRIQUE VIA LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Il paraît donc indéniable que dans un délai plus ou moins long, la génération d'électricité soit réalisée en grande partie par des filières renouvelables. La plus commune est certainement la filière hydraulique dont la participation à la production mondiale, en 2009, se chiffrait à 16.2%. Il est possible de classer les filières de production d'énergie renouvelables en deux catégories de production :

COMMANDABLE Comprend les filières dont la production d'énergie est commandable, où les quantités d'énergie produites peuvent être estimées a priori et où la production peut être planifiée de manière fiable. Cette catégorie comprend les filières comme l'hydraulique (gravitaire, houlomotrice), géothermie, biomasse, etc.

STOCHASTIQUE Par opposition aux commandables, comprend les filières dont la production est peu contrôlable, et où les quantités d'énergie produites sont difficilement prévisibles. Cette catégorie comprend les filières comme l'hydraulique (marémotrice), éolienne, solaire (thermique, photovoltaïque), etc. Dans ce type de filières, la production est fortement liée aux conditions météorologiques et climatiques. Bien qu'il soit possible, par le moyen de statistiques, de prévoir une quantité moyenne d'énergie produite sur une période donnée, il est difficile de planifier précisément une production instantanée.

Alors que le développement des filières de production d'électricité renouvelables de type commandable est en cours depuis de nombreuses années, une forte croissance est attendue pour les filières stochastiques dans les prochaines années. A titre d'exemples, les projections de la filière éolienne prévoient une couverture de 15.7% de la production

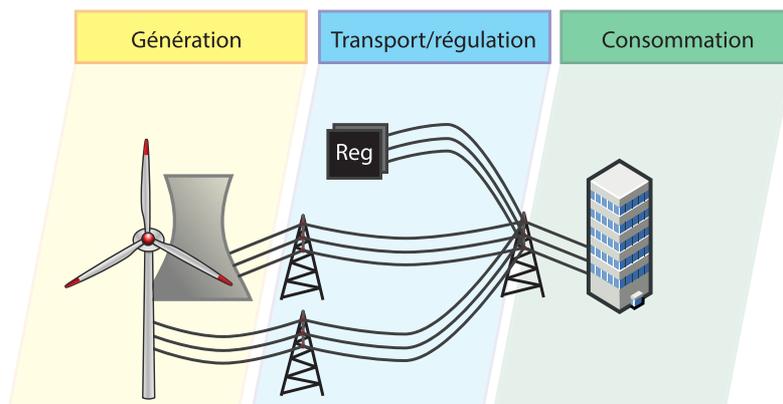


FIGURE 1.4 : Trois composantes principales d'un réseau électrique

d'électricité européenne d'ici à 2020 [8]. La filière photovoltaïque, quant à elle, table sur une couverture de 4 à 6% de la production électrique européenne d'ici à 2015 [9].

1.2 PROBLÉMATIQUES INDUITES

1.2.1 Intermittence des sources d'énergie sur le réseau électrique

Au vu des éléments précédents, la dépendance croissante à l'énergie issue de filières renouvelables soulève des questions quant à la fourniture d'électricité au sein de réseaux interconnectés. En effet, sans revenir sur la théorie de fonctionnement des réseaux de transport d'électricité, la bonne marche de ces derniers requiert une adéquation entre la génération et la consommation d'énergie en tout temps. Hormis la réserve tournante (qui consiste en l'inertie des machines connectées au réseau), la capacité d'un réseau de transport à stocker de l'énergie est pratiquement nulle. Ainsi, une génération trop importante (ou une consommation trop faible) induit une augmentation de la fréquence du réseau, alors qu'une génération insuffisante (ou une consommation trop importante) induit une diminution de la fréquence du réseau.

Un faible écart à la fréquence nominale du réseau électrique existe constamment, du fait qu'il est impossible d'avoir une adéquation exacte entre l'offre et la demande d'énergie. Il existe des mécanismes (réglages primaire et secondaire, figure 1.4) qui permettent de compenser de tels écarts, et de maintenir la fréquence réseau à une valeur proche de la consigne.

Cependant, ces automatismes de régulation présentent des limites, notamment lorsque l'écart génération/consommation est important et lorsque les variations de ce dernier sont brusques. Les filières de génération renouvelables de type stochastique incarnent, par essence, ces derniers points. Les prévisions de production sont peu précises, et la volatilité de la production est importante. Comme conséquence directe, l'accroissement de la volatilité des prix du marché de l'énergie, notamment en Allemagne, où il n'est pas rare de rencontrer des prix négatifs [10], mais surtout la nécessité d'avoir sur le réseau des dispositifs permettant de pallier aux variations rapides de la génération d'électricité.

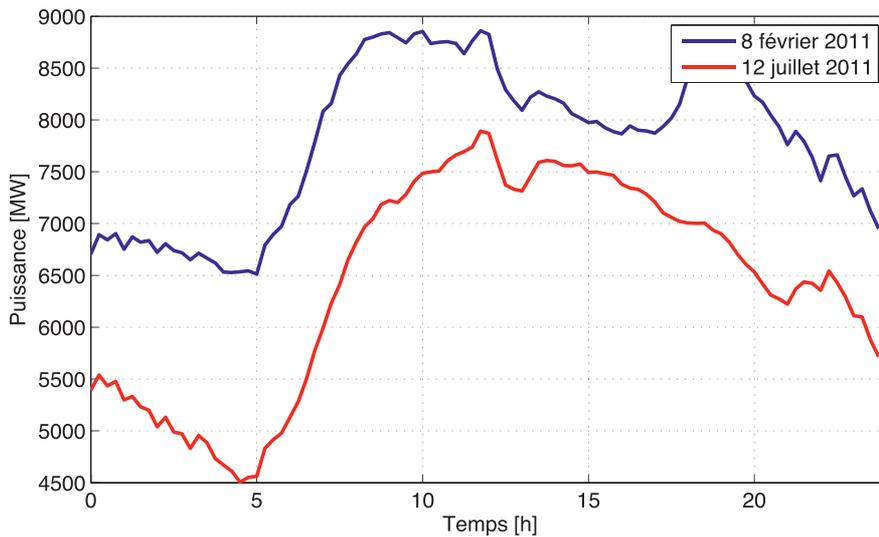


FIGURE 1.5 : Profils de consommation d'électricité en Suisse (données Swissgrid)

1.2.2 Non-adéquation génération/consommation

L'accroissement de la part des renouvelables de type stochastique dans la génération d'électricité soulève la question de la simultanéité de la génération et de la consommation. En effet, avec une grande part de génération de type commandable dans le *mix* énergétique, il est aisé de calquer la quantité d'énergie générée sur celle consommée. Dans le cas contraire, il est nécessaire de prévoir un dispositif permettant de compenser le surplus ou le déficit de génération, dans le but de garantir la sécurité de l'approvisionnement énergétique.

La comparaison de ces profils de consommation d'énergie électrique, présentés en figure 1.5, avec des profils de génération d'électricité par des sources de type renouvelable stochastique laisse entrevoir des différences fondamentales. Ainsi, sur la figure 1.6 (a), où sont présentés des profils de génération photovoltaïque de la centrale solaire de l'EPFL d'une puissance maximale de 600 kW, il est possible de formuler les remarques suivantes :

- Il n'est pas possible de couvrir les besoins énergétiques durant la nuit ;
- La production d'énergie varie en fonction de l'ensoleillement. Par temps ensoleillé, la génération d'une installation est proche de sa valeur nominale vers midi. Par contre, en cas de temps couvert, la production est négligeable. Par temps partiellement nuageux, la production varie très fréquemment.

De même, en analysant la figure 1.6 (b) où sont présentés des profils journaliers de production cumulée de plusieurs sites éoliens dans le sud-est australien ($P_{max} = 2.1\text{GW}$), il est possible de formuler des remarques similaires :

- Il existe de fortes variations de la puissance générée, même si, du fait de la sommation des productions d'un grand nombre d'unités distantes de plusieurs centaines de kilomètres, les constantes de temps sont plus longues ;
- La production d'énergie varie en fonction de la vitesse du vent. Il existe de longues périodes durant lesquelles la puissance générée par ces installations est de l'ordre de grandeur de 20% de la puissance nominale.

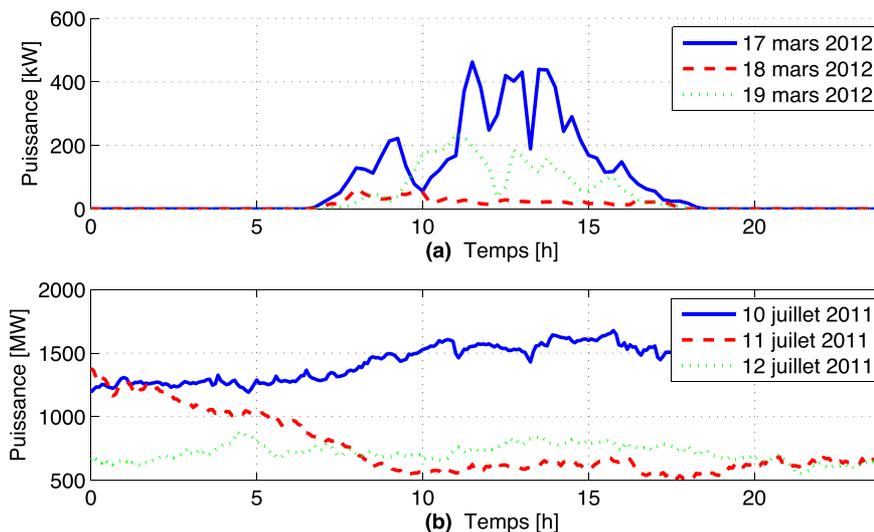


FIGURE 1.6 : Profils de production de sources renouvelables (a) solaire photovoltaïque (données Romande Energie, EPFL/LESO) (b) éolienne (données Australian Energy Market Operator)

L'examen des relevés de ces profils de production solaire photovoltaïque et éolien incite à une réflexion sur les propriétés d'un futur réseau électrique dont une grande partie de la génération provient de sources renouvelables stochastiques. Un tel réseau doit, d'une part, pouvoir faire face à des variations rapides de la génération, ainsi qu'à des écarts temporaires importants entre la génération et la production. En plus de cela, un tel réseau doit être capable de supporter des déficits de génération d'électricité sur de longues périodes.

Etant donné que la production médiane de sources de type renouvelable stochastique est faible par rapport à la puissance installée (10 à 30%), le réseau électrique doit également être capable de pouvoir absorber des excédents de génération, lorsque, par exemple, les conditions météorologiques sont très favorables.

1.2.3 Conséquences

La problématique du futur des réseaux électriques qui a été mise en évidence en guise d'introduction à ce travail permet de mettre en exergue deux points fondamentaux envers le rapport à l'énergie électrique :

- Il sera de plus en plus souvent nécessaire de faire appel à des dispositifs de stockage de l'énergie. De plus, le bon sens ainsi que les nouveaux objectifs politico-énergétiques voudraient que ces dispositifs de stockage de l'énergie proposent un bon rendement. En d'autres termes, un système de stockage devrait être capable de restituer un maximum de l'énergie qui y a été stockée, et ainsi réduire les pertes au minimum ;
- Devront être introduits des systèmes qui ont la capacité de stocker de l'énergie, puis restituer cette dernière à puissance élevée, sur une courte durée.

C'est dans le cadre de ces deux idées-clé que s'inscrit ce travail. Bien que les problématiques du stockage et de la gestion efficace de l'énergie fassent déjà partie de l'état-de-l'art, de nombreuses questions se posent encore afin de tendre vers un stockage dont le dimensionnement est optimal.

1.3 STOCKAGE D'ÉNERGIE

D'un point de vue très général, toute énergie est stockée sous une certaine forme en tout temps. En effet, selon le premier principe de la thermodynamique, la création d'énergie est impossible. Ceci implique que chaque processus engendrant un travail implique un déstockage d'énergie et sa transformation, tendant vers une diminution de l'énergie du système considéré. A titre d'exemple, un véhicule transforme par le biais d'un moteur à combustion interne l'énergie stockée au sein du carburant (qu'on dira stockée sous forme chimique) en énergie cinétique appliquée à la masse du véhicule ainsi qu'en énergie thermique, qui est la manifestation des pertes tout au long de la chaîne de conversion.

Il est possible de distinguer deux types d'énergie stockée :

- L'énergie dite primaire qui peut être définie comme toute énergie disponible dans la nature, dont seule l'extraction est possible. Exemples : l'énergie des éléments naturels (hydraulique, éolienne), l'énergie des combustibles (biomasse, hydrocarbures,...), l'énergie nucléaire, solaire, etc.
- L'énergie dite secondaire, qualifiée de vecteur énergétique, est définie comme toute énergie obtenue par une transformation d'un ou plusieurs types d'énergie primaire. Exemples : électricité, combustibles raffinés, hydrogène, etc.

De manière analogue, il est possible de définir deux types de stockage d'énergie :

- L'accumulateur d'énergie dit *primaire* possède la capacité de fournir de l'énergie ; la réaction qui libère l'énergie n'est pas réversible, et le flux d'énergie est donc unidirectionnel ;
- L'accumulateur d'énergie dit *secondaire* possède, en plus de la faculté de fournir de l'énergie, la faculté d'absorber de l'énergie. La réaction qui libère l'énergie est qualifiée de réversible, et le flux d'énergie peut être bidirectionnel.

Bien que ces définitions simples permettent de catégoriser la majorité des accumulateurs d'énergie [11], il reste que la notion de réversibilité des réactions au sein de certains accumulateurs peut être mise en question. En effet, il conviendra de noter que la réversibilité des accumulateurs est une variable nuancée qui peut être qualifiée de plus ou moins bonne. Ainsi, sans tenir compte du processus de vieillissement des éléments, un accumulateur dont la réversibilité est bonne proposera un bon rendement énergétique à la recharge, alors qu'un accumulateur dont la réversibilité est mauvaise proposera un faible rendement à la recharge. Les accumulateurs de type secondaire à très mauvaise réversibilité présentent un comportement proche des accumulateurs primaires et seront donc considérés comme tels.

Une autre facteur influençant la réversibilité est la durée nécessaire au processus. Il est possible de distinguer les accumulateurs à réversibilité immédiate, qu'il est possible de recharger dans un délai très court, aux accumulateurs à réversibilité retardée. Pour ces derniers, il est possible de distinguer ceux dont la réversibilité implique un délai temporel à ceux dont la réversibilité impose une contrainte en puissance (le débit

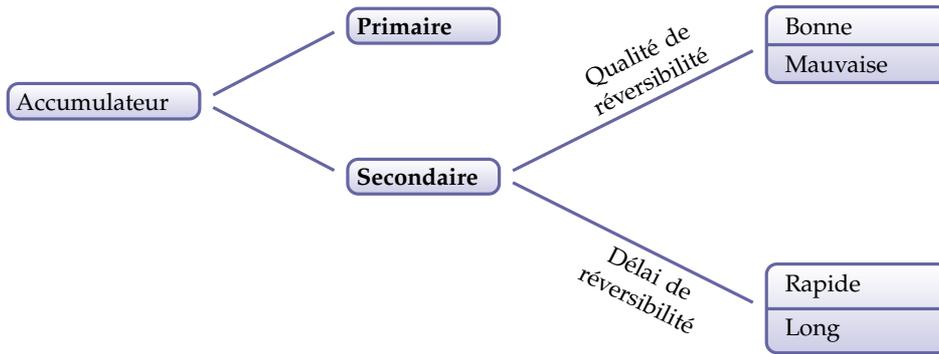


FIGURE 1.7 : Classification des accumulateurs d'énergie

d'énergie y est limité). Les accumulateurs d'énergie présentant un délai important de réversibilité présentent, à court terme, un comportement similaire aux accumulateurs de type primaire. La figure 1.7 résume les cas présentés jusqu'ici.

1.3.1 Formes de stockage de l'énergie électrique

Au-delà de ces quelques propriétés intrinsèques des accumulateurs d'énergie, il est possible de compléter la classification des différentes formes d'énergie stockées en fonction de leur nature. La figure 1.8 présente une liste non-exhaustive d'accumulateurs secondaires qui sont couramment utilisés dans le domaine du stockage d'énergie électrique. Alors que certaines de ces formes de stockage sont directement compatibles avec les grandeurs électriques (batteries, etc.), d'autres nécessitent l'usage de dispositifs (interfaces) qui permettent la conversion de l'énergie stockée sous forme de grandeurs électriques : formes mécaniques et thermiques notamment.

Dans le but de comparer les différentes formes de stockage de l'énergie entre-elles, il est possible de mettre en avant certaines de leurs propriétés principales :

- La capacité énergétique définit la quantité d'énergie qu'il est possible de stocker au sein d'un accumulateur ;
- La capacité en puissance exprime la puissance maximale qu'un accumulateur est capable de fournir dans un régime de fonctionnement normal. Un dépassement de la capacité en puissance d'un accumulateur peut porter atteinte à ses performances d'une manière permanente, voire à sa destruction ;
- L'auto-décharge quantifie le phénomène qui conduit à la réduction progressive de la quantité d'énergie stockée au sein d'un accumulateur ;
- Le rendement exprime la performance énergétique de l'accumulateur. En effet, les actions de charge et décharge d'un accumulateur sont des processus qui nécessitent un apport d'énergie supplémentaire à celle qui sera stockée puis restituée ;
- La cyclabilité est un indicateur de la durée de vie d'un accumulateur en fonction du nombre de cycles de charge/décharge réalisés ;
- La durée de vie exprime le vieillissement d'un accumulateur qui ne dépend pas de son usage ;
- Le coût (par unité de puissance ou d'énergie) résume l'investissement total lié à un accumulateur (achat, entretien). Le rendement peut avoir un impact prépondérant sur le coût total de l'usage d'un accumulateur, dans le sens où, si le rendement

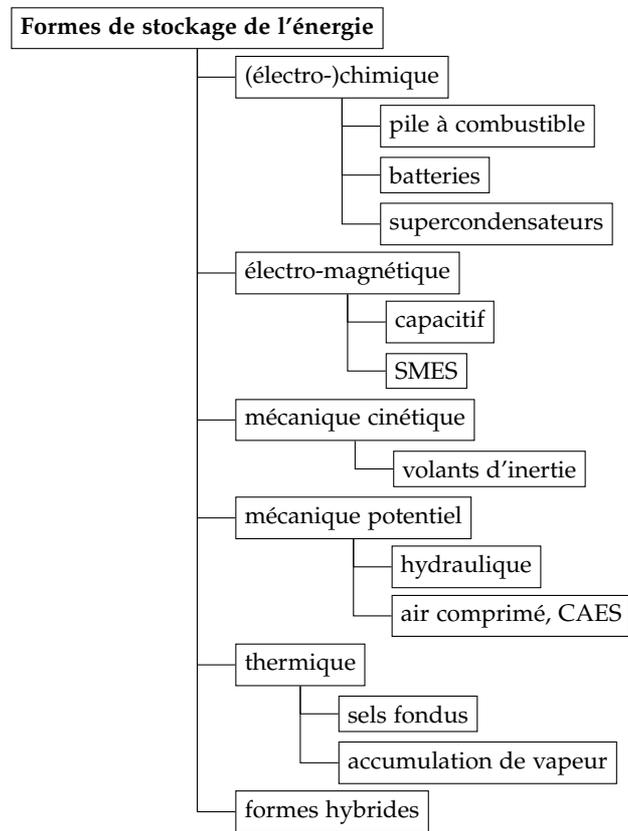


FIGURE 1.8 : Formes de stockage d'énergie

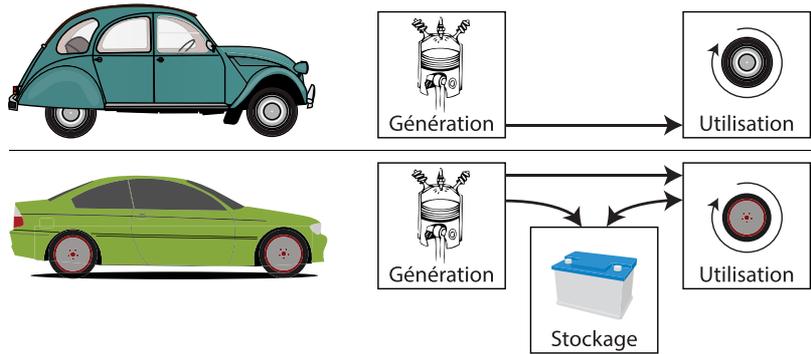


FIGURE 1.9 : Comparaison de la chaîne de traction d'un véhicule standard (haut) à celle d'un véhicule hybride (bas)

est faible, une quantité importante d'énergie devra être dépensée afin de pouvoir procéder au stockage.

Quantité d'autres propriétés peuvent être mises en évidence, notamment la sécurité, la recyclabilité, etc. Pour une comparaison des différentes formes de stockage de l'énergie en fonction des paramètres présentés ci-dessus, il est possible de se référer à de nombreuses publications [12, 13, 14].

1.3.2 *Systèmes à stockage multiple ou systèmes hybrides*

La démocratisation, aux yeux du grand public, des systèmes à stockage intermédiaire d'énergie a été initiée par l'entrée sur le marché des premiers véhicules dits hybrides à l'aube des années 2000. Cet apport a permis de mettre en évidence la mauvaise utilisation de l'énergie dans certains processus où la génération de l'énergie est liée temporellement à la consommation de cette dernière. Il a donc été démontré à plusieurs reprises que l'introduction d'un accumulateur d'énergie au sein d'un schéma classique de génération/consommation (figure 1.9) permettait des économies d'énergie importantes, économiquement rentables [11, 14, 15]. Cet ajout permet, d'une part, de découpler temporellement les besoins en énergie de la génération de cette dernière, et d'autre part, de transformer un système unidirectionnel (l'énergie va du moteur aux roues) en un système partiellement bidirectionnel (où il y a possibilité de stocker l'énergie cinétique du véhicule lors d'un freinage). La figure 1.10 compare les sollicitations en puissance d'un tel système avec celles de l'approche classique.

En résumé, bien que l'usage de systèmes à stockage intermédiaire rencontre un intérêt croissant dans les domaines des transports (voiture, bus, etc.), des alimentations de secours ou l'alimentation de charges impulsives [16, 17], un nombre important de points dans le processus de dimensionnement restent vagues ou mal définis : choix des accumulateurs/générateurs, connexion des sources et, plus particulièrement, la question fondamentale de la nécessité d'un accumulateur hybride au sein d'un système. Enfin, l'introduction d'importantes sollicitations en puissance des accumulateurs soulève la problématique du rendement de ces transferts rapides d'énergie.

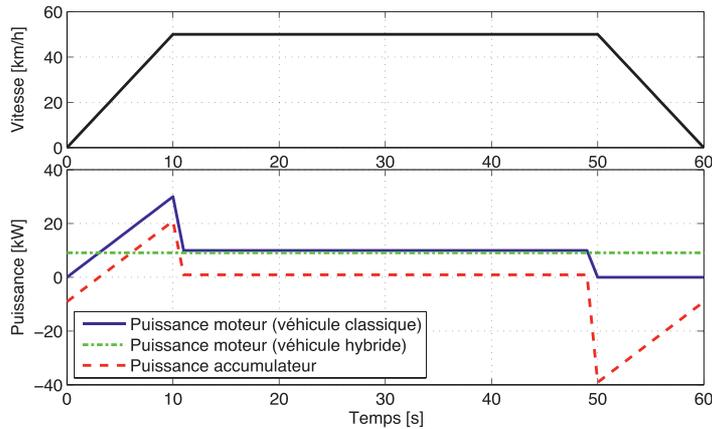


FIGURE 1.10 : Comparaison des profils de puissance d'un véhicule standard (trait plein) et d'un véhicule hybride (pointillés)

1.4 OBJECTIFS DE CE TRAVAIL

En regard des idées développées lors des pages précédentes, ce travail pose les objectifs suivants :

1. Développer des outils nécessaires à l'étude et à l'évaluation des performances de l'alimentation de systèmes ;
2. Déterminer les critères qui permettent de définir si un système d'accumulateur hybride est nécessaire ou utile pour l'alimentation de dispositifs électriques ;
3. S'il y a lieu, définir les critères de choix du type d'accumulateur hybride à utiliser, mais aussi les topologies de connexion entre les différents éléments du système hybride ;
4. Mettre en évidence la problématique du transfert rapide d'énergie, ainsi que de modéliser le rendement d'un système présentant de telles caractéristiques ;
5. Proposer des solutions pour l'alimentation des systèmes intermittents, démontrer la fonctionnalité d'un système d'adaptation de puissance multi-étagé et modéliser le rendement de ce dernier.

1.5 SYNTHÈSE ET STRUCTURE DU DOCUMENT

Ce chapitre introductif s'est attaché à mettre en évidence la problématique actuelle de la production et de la consommation d'énergie. Cette dernière démontre le besoin croissant en systèmes performants de stockage de l'énergie, ainsi que l'enjeu que ces derniers porteront au sein de la chaîne d'alimentation énergétique mondiale.

La présentation de certaines caractéristiques principales des accumulateurs d'énergie a permis d'insister sur l'intérêt qui peut exister à associer deux types d'accumulateurs distincts afin de proposer une performance plus intéressante, au sein d'un système hybride de stockage de l'énergie. De même, l'exemple du véhicule a illustré l'intérêt de l'insertion d'un accumulateur d'énergie au sein d'une chaîne d'alimentation unidi-

rectionnelle, afin de former un système hybride qui permet des économies d'énergie importantes.

Les objectifs de ce travail étant définis, la suite de ce document s'articule de la manière suivante :

Le chapitre 2 s'attarde à la définition des éléments nécessaires à la bonne compréhension des systèmes énergétiques. Une classification des sources d'énergie y est abordée ; cette dernière permet ensuite de formuler des règles d'association qui régissent la connexion directe entre deux sources. Dans un second temps, les performances de l'alimentation d'une charge par une source sont examinées, sur la base de modèles préalablement définis. Les conséquences de l'alimentation directe de charges sont mises en évidence ; ces dernières permettent de souligner le surdimensionnement des accumulateurs qui peut s'avérer nécessaire.

Le chapitre 3 définit, dans un premier temps, les systèmes hybrides, puis réalise une classification de ces derniers en 4 groupes distincts, différenciés par la fonctionnalité conférée au système hybride. Puis, en se basant sur les outils développés au chapitre 2, il est question de déterminer, pour chaque classe de système hybride, les caractéristiques qui doivent être proposées par chacun des accumulateurs ainsi que la manière d'interconnecter ces derniers.

Le chapitre 4 étudie un cas d'application pour les procédures développées au chapitre 3. Un accumulateur hybride composé d'un supercondensateur et d'un accumulateur électrochimique lithium-ion sera dimensionné afin de conférer au système une plus grande versatilité. Les détails du fonctionnement du système seront étudiés, et un accent particulier sera mis sur la recharge rapide de l'accumulateur hybride, qui est la fonctionnalité clé proposée par le système hybride. Pour terminer, la validation expérimentale du dispositif sera brièvement exposée.

Le chapitre 5 suggère de généraliser la problématique du transfert rapide d'énergie, soulevée lors du chapitre 4, aux systèmes dont la consommation est fortement intermittente. La classification de ces systèmes montre que dans certaines conditions, l'alimentation de ces derniers peut être réalisée via un étage tampon afin de soulager la source d'énergie des contraintes en puissance. Deux systèmes y sont modélisés, et le rendement énergétique qu'ils proposent sera détaillé.

Le chapitre 6 suggère un cas d'application pour le système d'alimentation à stockage intermédiaire bi-étagé décrit et modélisé au chapitre 5. Ce dernier, dont l'alimentation primaire est réalisée par une cellule photovoltaïque, sera décrit, puis chacun de ses composants seront modélisés. Le rendement de la chaîne d'alimentation sera évalué, tout comme le facteur d'amplification de puissance. Finalement, la validation expérimentale du dispositif sera détaillée.

Le chapitre 7 clôt ce document en présentant une synthèse des résultats et des contributions de ce travail. En guise de conclusion, les perspectives ouvertes par ce dernier seront introduites.

Deuxième partie

OUTILS ET MÉTHODES DE LA GESTION ÉNERGÉTIQUE

Avant d'aborder les sujets liés aux systèmes hybrides et transferts rapides d'énergie, la présente partie souhaite mettre en place les outils nécessaires au développement des chapitres suivants. Il sera question de l'étude, de la qualification et de la bonne compréhension des systèmes électriques à alimenter, mais aussi des dispositifs de stockage qui servent à fournir l'énergie à ces derniers.

SOURCES D'ÉNERGIE, CHARGES ET ALIMENTATION

2.1 OBJECTIFS

Ce chapitre a pour but de formaliser les notions d'énergie, de source d'énergie, de puissance, ainsi que toutes les notions s'y rapportant, afin que les développements ultérieurs puissent faire usage de ces définitions.

Après avoir défini les notions de base, une classification des sources d'énergie sera abordée, par le biais de leurs caractéristiques : réversibilité, nature, etc. Se basant sur cette classification, des règles définissant la possibilité d'associer directement deux sources d'énergie seront proposées.

Une fois ces critères définis, le chapitre souhaite mettre en évidence la quantité d'énergie qui peut être extraite d'un accumulateur en fonction de la charge qui y est connectée. Cette démarche a pour objectif d'aller au-delà des définitions classiques des sources d'énergie qui se bornent à quantifier les capacités en puissance et énergétiques. Dans ce but, des modèles de charges seront proposés, tout comme un modèle générique d'accumulateur. Le rendement d'extraction d'énergie sera commenté pour chacun des cas, et des conclusions générales sur l'alimentation directe d'un système seront formulées.

2.2 DÉFINITIONS

Au cours du chapitre introductif, quelques termes liés aux stockage d'énergie ont été utilisés. Les prochaines lignes s'attardent sur la définition claire du vocabulaire qui sera repris tout au long de ce travail.

2.2.1 *Energie*

Selon [18, 19], l'énergie peut être définie comme "la capacité de faire un travail". En d'autres termes, il s'agit de l'aptitude (immatérielle) à fournir un travail, au sens physique du terme (mouvement, chaleur, rayonnement électromagnétique, etc.).

Sous-jacent à cette définition, et en guise de corollaire, se dessine la notion de stockage d'énergie. En effet, selon la loi de la conservation de l'énergie, l'énergie totale est invariante au cours du temps dans tout système isolé ; l'énergie ne se crée donc pas. Il sera plus avisé de dire que cette dernière se stocke et, parfois, se transforme.

De cette définition d'énergie, il n'est possible de tirer que peu d'informations. C'est pourquoi il a été choisi de proposer une définition de l'énergie couramment utilisée et plus à même de s'appliquer dans le cadre de ce travail :

L'énergie, exprimée en Joule, est une quantité immatérielle et non mesurable définie par l'intégrale temporelle de la puissance, ou $W = \int P dt$.

Afin d'étendre et de préciser cette dernière, il est proposé de se référer aux définitions usuelles introduites par la thermodynamique. En plus de l'introduction des trois principes fondamentaux, ces définitions mettent en avant les notions d'état d'un système, d'entropie, de système fermé, etc. qui dépassent le cadre de ce travail.

2.2.2 *Puissance*

Le problème de la définition de l'énergie, au cours des lignes précédentes, s'est résolu par le lien au terme de puissance. Il est évident que la définition de l'énergie reste incomplète, tant que ce second terme n'est pas clarifié.

La définition de la puissance est un problème du même ordre que celui rencontré avec les définitions classiques de l'énergie. Nombre d'entre-elles sont proposées par le biais d'ouvrages et de traités. Sans vouloir en citer pléthore, mentionnons celle du Trésor de la langue française [19] : "La puissance est [...] la quantité d'énergie produite, consommée ou transférée par unité de temps [...]"; mathématiquement $P = \frac{dA}{dt}$.

Il n'est en effet pas rare d'observer, dans la littérature, que les définitions de puissance se rapportent à celles de l'énergie et vice-versa ; ce qui est loin de résoudre le problème actuel. Ainsi, dans le but d'obtenir une définition indépendante de la puissance, il est nécessaire de pouvoir exprimer cette dernière en fonction d'autre chose que de l'énergie. La proposition est la suivante :

Assimilable à un débit d'énergie, la puissance est une quantité immatérielle et non mesurable directement définie par le produit de deux grandeurs qui, liées à une source d'énergie, satisfont les conditions suivantes :

- Une des grandeurs présente une notion assimilable à un potentiel ;
- La seconde présente une notion assimilable à un débit (donc lié au temps) ;
- Le produit de ces variables s'exprime dans l'unité du système international en Watt (W).

Citons quelques exemples :

- Electricité : tension - courant (débit de charge) ;
- Dynamique : force - vitesse, couple - vitesse angulaire ;
- Thermique : température - débit massique ;

2.2.3 Source d'énergie

Communément, est nommé source d'énergie un objet (un élément physique) qui peut fournir ou absorber de l'énergie, peu importe la forme de cette dernière. Bien que cette formulation paraisse correcte pour un usage général, cette dernière définit implicitement les notions de stockage, de création ou de destruction de l'énergie. Ces deux dernières notions étant contraires à la physique et notamment au premier principe de la thermodynamique, on pourrait en conclure que le terme source d'énergie pourrait être étroitement lié à la notion de stockage. Ce qui est lacunaire.

La définition suivante est donc proposée :

La qualité de source d'énergie peut être attribuée à un élément ou à un ensemble d'éléments physiques qui procèdent à une conversion d'énergie et/ou à un stockage (resp. déstockage) de cette dernière, dans le but de la simplification de la représentation et modélisation d'un système.

Ainsi, la source d'énergie n'existe pas. Il s'agit d'une barrière permettant de limiter l'étendue d'un modèle et de sa représentation. Elle est donc utilisée lors d'une simplification de la représentation ou modélisation d'un système. En voici plusieurs exemples :

- L'élément *résistance électrique* procède à une conversion d'énergie électrique vers de l'énergie thermique. Lors de la représentation de son comportement, ce dernier est, en général, restreint à la description du comportement électrique uniquement. Dans ce sens, la résistance électrique peut être qualifiée de source d'énergie, même si cette dernière n'est pas un accumulateur d'énergie.
- Lors de la représentation et de la modélisation d'un système électronique alimenté par le réseau électrique triphasé, ce dernier est en général qualifié de source d'éner-

gie. Cette simplification permet à l'utilisateur de représenter et modéliser son système d'une manière plus simple, en considérant cette source, par exemple, comme une source de tension.

- Un ensemble de cellules photovoltaïques est aussi généralement considéré comme source d'énergie. Ceci permet de simplifier la représentation et la modélisation du système en omettant une partie de la chaîne énergétique (conversion de l'énergie électromagnétique en électrique, conditions météorologiques, position spatiale, etc.).

A la suite de ces exemples, on conclut que l'usage de la notion de source d'énergie est étroitement lié à la représentation et la modélisation d'un système énergétique, et donc aux objectifs recherchés par la représentation et la modélisation d'un système donné.

2.2.3.1 Exemple : usage de la source d'énergie dans la représentation partielle d'un système

On se propose de représenter un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur à combustion interne (ICE). La figure 2.1 présente 4 représentations simplifiées de ce système avec l'outil de représentation énergétique macroscopique (REM/EMR) [20, 21]. Le lecteur se référera à l'annexe A pour une description de cette forme de représentation qui sera utilisée à plusieurs reprises tout au long de ce document.

Avec ces représentations macroscopiques, on souhaite mettre en évidence les différentes façons de représenter et modéliser la partie qui traite de l'alimentation en énergie du véhicule, en jouant sur le (non-)usage de sources d'énergie telles que définies ci-dessus. Pour ce faire, plusieurs hypothèses de travail sont formulées : rendement unitaire, trajectoire rectiligne, ... Les 4 représentations de la figure 2.1 ont en commun les deux éléments de droite qui sont respectivement :

- un élément de stockage, en jaune, qui représente les inerties rapportées du véhicule ; ce dernier lie les couples appliqués (T_{ice} , T_{env}) à la vitesse de rotation de l'arbre de la manière suivante :

$$T_{ICE} + T_{env} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.1)$$

- l'environnement, en vert, qui est une source d'énergie qui représente les réactions de l'environnement vis-à-vis du véhicule (traînée, résistance au roulement, altitude, etc.). Ici :

$$T_{env} = \frac{1}{2} \rho S C_x \frac{\omega^2}{r} \quad (2.2)$$

On note que la transmission n'est pas représentée dans ce modèle simplifié. Par conséquent, la vitesse de rotation des roues est égale à la vitesse de rotation de l'arbre moteur. Pour chacune de ces représentations, on note :

- A) Dans ce premier cas de figure, on considère que le moteur à combustion interne (ICE) est une source d'énergie. Cette hypothèse permet, en accord avec la définition de source, de ne pas considérer tout ce qui est en amont de cet élément. De cette manière, il est possible de modéliser le moteur comme étant un élément contrôlé en couple avec un retard τ dans lequel on modélise aussi un frottement proportionnel à la vitesse de l'arbre ($T_{frot} = \kappa\omega$) :

$$T_{ICE} = T_{ref} \frac{1}{\tau + s} - \kappa\omega \quad (2.3)$$

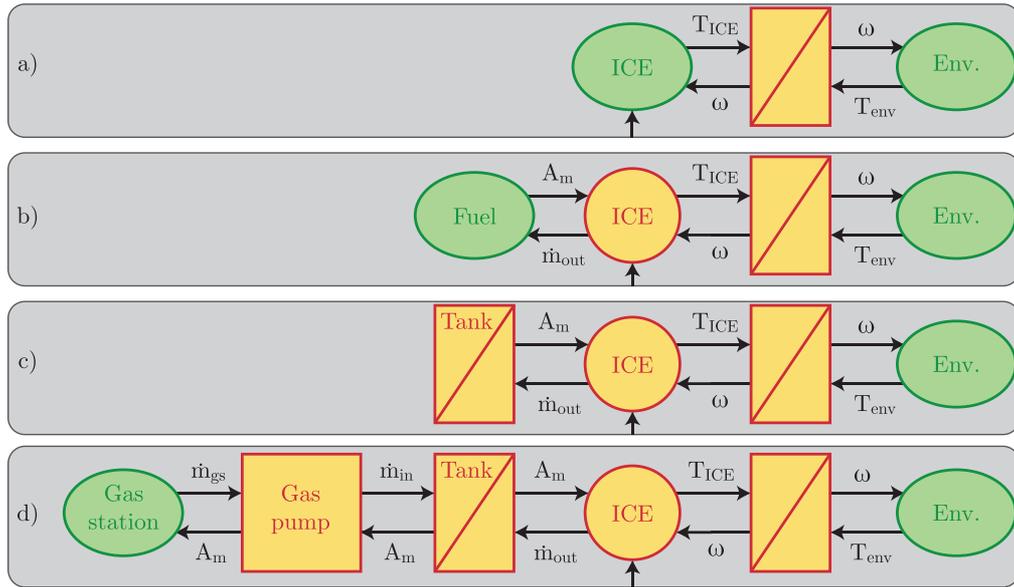


FIGURE 2.1 : Exemples de représentations simplifiées d'un véhicule à moteur

Bien que cette représentation permette de mettre en évidence la dynamique de la traction, elle n'est que difficilement exploitable pour la partie qui concerne l'alimentation en énergie du moteur.

- b) La seconde représentation du système ne considère plus le moteur à combustion interne comme étant une source d'énergie, mais comme un système de conversion d'énergie multi-physique. En effet, d'un point de vue macroscopique, ce dernier est alimenté en énergie (côté gauche) par de l'essence. L'essence impose au moteur son pouvoir calorifique inférieur (PCI ou Lower Heating Value) massique A_m , alors que le moteur impose le débit massique de l'essence \dot{m} . Dans cette modélisation simplifiée, on considère un rendement global de conversion η_c . Ainsi, on conserve l'équation (2.3), et on y ajoute :

$$\dot{m} = \frac{T_{ref}\omega}{A_m\eta_c} \frac{1}{\tau + s} \quad (2.4)$$

Cette façon de procéder permet, au-delà de ce que permettait la représentation et la modélisation précédente, de mettre en évidence les relations entre la consommation et la génération d'énergie au niveau du moteur (son rendement), mais reste incomplète pour tout ce qui est en amont. Ainsi, avec ce modèle, il est impossible de traiter distinctement la partie stockage d'énergie, étant donné que cette dernière est masquée par la source d'énergie placée au niveau de l'alimentation en essence.

- c) Pour pallier à ce manque, la représentation et la modélisation du système peuvent être étendues au réservoir d'essence. Implicitement, il s'agit d'un accumulateur d'énergie (de masse en l'occurrence) dont on peut modéliser le comportement ainsi :

$$W_{stock} = A_m \int (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) dt + m_0 \quad (2.5)$$

Selon la présente représentation, l'entrée de masse (recharge) est inexistante, ainsi \dot{m}_{in} est nul en tout temps pour ce système. La différence principale qui existe

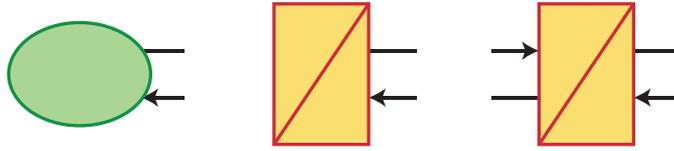


FIGURE 2.2 : Remplacement en REM d'éléments accumulateurs d'énergie (représentations du centre et de droite) par une source d'énergie (à gauche)

entre cette représentation et les deux précédentes est qu'aucune source d'énergie n'est présente sur la représentation de l'alimentation en énergie du moteur. Cela signifie que, selon cette représentation, aucune partie de l'alimentation en énergie n'est masquée. En d'autres termes, cette représentation présente la chaîne complète (mais simplifiée) de stockage et d'alimentation en énergie du moteur à combustion interne. Elle permet la compréhension et la simulation de l'alimentation, mais aussi de la gestion de l'énergie embarquée, permise par le remplacement de la source d'énergie par un accumulateur d'énergie.

- D) Ce dernier exemple présente une version encore plus complète de l'alimentation en énergie du moteur à combustion interne d'un véhicule qui est étendue à la recharge du réservoir d'essence. Cette version ajoute à la gauche du système un élément de conversion mono-physique qui représente la pompe à essence, ainsi que la réserve d'essence disponible à la station service, représentée par une source d'énergie. Cette manière de faire, permet de s'affranchir de la modélisation du réservoir d'essence de la station, ainsi que tous les éléments en amont de cette dernière. La modélisation de la partie additionnelle du système est réalisée de la manière suivante :

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{ref} \quad (2.6)$$

$$A_m = cst \quad (2.7)$$

Cet exemple a permis d'aborder plusieurs représentations et modélisations de la chaîne d'alimentation d'un véhicule à moteur à combustion interne. On note que, en fonction des objectifs de la représentation et de la modélisation d'un système, des sources d'énergie peuvent être introduites, afin de procéder à la simplification de cette dernière en permettant d'omettre une partie de la chaîne. Les remplacements effectués sont résumés à la figure 2.2.

Cependant, toujours en regard des objectifs, le placement des sources d'énergie doit être réalisé de manière attentive, afin de ne pas occulter certains éléments nécessaires, comme sur les représentations a) et b) de la figure 2.1, qui sont incomplètes et ne permettent pas d'atteindre les objectifs fixés.

Cet exemple a permis de mettre en exergue l'utilisation de la source d'énergie dans la représentation et la modélisation d'un système. De plus, la qualité de source d'énergie et les implications y relatives ont été décrites.

2.3 CLASSIFICATION ET PROPRIÉTÉS DES SOURCES D'ÉNERGIE

Les principales définitions étant posées, cette section va tâcher de classer et dénombrer les propriétés des différents éléments pouvant être qualifiés de source d'énergie. Dans un premier temps d'une manière très large, puis, au fur et à mesure, focalisée sur les systèmes électriques, une classification de ces sources sera abordée.

2.3.1 *Forme d'interface*

La forme de l'énergie produite ou absorbée par une source est le premier critère de classification. Dans la représentation REM, la forme d'énergie est indiquée par les variables d'action et de réaction aux bornes d'une source d'énergie. Lors de l'introduction de ce travail, une classification des différentes formes de stockage d'énergie a été abordée. La figure 1.8 page 11 en présente un résumé.

Il est cependant avisé de dissocier la forme de stockage de l'énergie (s'il y a lieu) de la forme d'interface, qui peuvent être différentes. Les formes principales d'interface de l'énergie sont notamment :

- électrique : dont le produit de la tension en V et du courant en A forment la puissance ;
- mécanique linéaire : dont le produit de la force en N et de la vitesse en $\frac{m}{s}$ forment la puissance ;
- mécanique tournant : dont le produit du couple en Nm et de la vitesse angulaire en $\frac{rad}{s}$ forment la puissance ;
- transfert de masse : dont le produit du pouvoir calorifique supérieur en $\frac{J}{kg}$ et le débit de masse en $\frac{kg}{s}$ forment la puissance ;
- oléo-hydraulique : dont le produit de la pression en Pa et du débit en $\frac{m^3}{s}$ forment la puissance ;
- etc.

2.3.1.1 *Accumulation*

Selon la définition de la source d'énergie qui a été proposée plus haut, la propriété d'accumuler de l'énergie existe pour les sources, mais n'est pas nécessaire. Il s'agit donc de dissocier les trois types de sources d'énergie :

- Celles qui possèdent la propriété d'accumulateur d'énergie uniquement, mais pas celle d'interface. Leur capacité à fournir ou absorber de l'énergie est uniquement définie par l'énergie stockée ; la quantité d'énergie disponible est limitée. Exemple : un accumulateur électrochimique ;
- Celles qui possèdent la double propriété d'accumulateur et d'interface. Leur capacité à fournir ou à absorber de l'énergie n'est pas limitée à l'énergie stockée. Exemple : un axe tournant est un accumulateur d'énergie (son inertie) mais aussi, s'il est entraîné, d'interface.
- Celles qui ne possèdent pas la propriété d'accumulateur, ou celles dont le comportement d'accumulateur n'est pas pris en compte lors de la modélisation font uniquement office d'interface. Exemple : la résistance électrique.

2.3.2 Flux d'énergie

Le flux d'énergie échangé entre deux sources d'énergie est, par définition, la puissance (§ 2.2.2). Dans la représentation REM, la puissance aux bornes d'une source est définie par le produit des variables d'action et de réaction d'un côté de la source.

On dénombre 3 types de sources vis-à-vis du flux d'énergie :

- Les sources dont la puissance est uniquement sortante. Une puissance sortante sera considérée, par convention, comme étant de valeur négative. Ces sources qui ne font que fournir un travail (de l'énergie) seront qualifiées de *générateur* ; on évitera absolument l'usage du terme *producteur d'énergie*, qui est quelque peu anti-physique. En effet, même si, en apparence l'énergie paraît être créée par la source, il n'en est rien, comme cela a été mentionné lors de la définition de la source (§ 2.2.3). Exemple : une pile électrique peut être qualifiée de source ; elle transforme une énergie potentielle chimique en énergie électrique ;
- Les sources dont la puissance est uniquement entrante. A l'inverse, une puissance entrante est considérée, par convention, étant de signe positif. Ces sources, qui ne font que consommer de l'énergie, seront qualifiées de *charge* ou *récepteur*. Exemple : la résistance électrique transforme l'énergie électrique en énergie thermique ;
- Les sources dont le flux d'énergie peut être entrant et sortant, mais pas simultanément. Ces dernières fournissent de l'énergie dans un temps, mais peuvent aussi en absorber dans un second temps. Ces dernières seront qualifiées de *réversibles* en puissance. Ce type de sources, qui peuvent être vues comme générateur et charge, est courant ; les éléments de stockage d'énergie en font notamment partie ;

Ces trois types de sources forment la base de la classification des sources d'énergie. Alors que les deux premières présentent un comportement plutôt bien défini, c'est sur la troisième catégorie que va se porter notre attention durant la fin de ce chapitre. En effet, après avoir terminé la classification des sources d'énergie, l'intérêt se portera sur les règles qui définissent la possibilité d'associer deux sources d'énergie.

2.3.3 Forme de la variable imposée

Selon les fondamentaux de la REM et suivant ce qui a été introduit au § 2.2.2, une source a été définie comme proposant deux variables, une considérée comme la voie d'action et la seconde, de réaction. L'une de ces dernières est apparentée à un potentiel alors que la seconde à un débit. Dans la majorité des cas, les sources d'énergie imposent l'un de ces paramètres, en fonction de leurs propriétés physiques. Ainsi, on dénombre 3 cas :

- Les sources *fortes* qui imposent la variable de type potentiel. Dans ce cas, la variable de potentiel est l'action de la source sur l'extérieur, alors que la variable de débit est la réaction de l'extérieur sur la source. Exemple : un accumulateur oléo-hydraulique impose la variable de potentiel qui est la pression ; il s'agit de son action. De par nature physique de la source, la pression est définie comme l'intégrale débit, qui, lui, est grandeur de réaction.
- Les sources *fortes* qui imposent la variable appariée à un débit. Dans ce second cas, la variable de débit est l'action de la source sur l'extérieur, alors que la variable de potentiel est la réaction de l'extérieur sur la source. Exemple : une inductance (élément électrique) ou un accumulateur à stockage magnétique supraconducteur

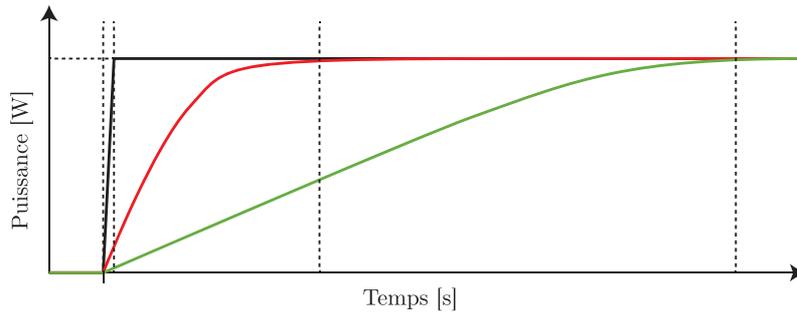


FIGURE 2.3 : Réponses en puissance d'une source quasi-immédiate (noir), non-immédiate (vert) et différée (rouge)

(SMES) imposent le courant électrique. Ici aussi, de par la nature physique du système, le courant est défini comme l'intégrale temporelle de la tension.

- Les sources qui n'imposent ni la variable de type potentiel, ni celle de type débit. Il s'agit des sources dites faibles. Exemple : la résistance électrique est une source *faible*. Les deux variables, tension et courant, peuvent être soit l'action et la réaction, soit inversement. Ainsi, dans le formalisme REM, une source faible peut avoir deux représentations, avec pour seule différence le croisement des variables d'action et de réaction.

2.3.4 Réponse temporelle

Les développements qui précèdent n'ont en aucun cas tenu compte de la répartition de la génération et/ou consommation d'énergie dans le temps. Ces derniers ont mis en évidence l'impact des directions de flux d'énergie dans la caractérisation des sources d'énergie. Dans un monde idéal, la source d'énergie est capable de délivrer (ou absorber) de la puissance dès lors que cette dernière est sollicitée. Dans la réalité, on distingue plusieurs types de réponses des sources d'énergie, représentées en figure 2.3, notamment :

- Les sources d'énergie à réponse quasi-immédiate. Ces sources sont capables de délivrer ou absorber de l'énergie dans un délai très court de l'ordre de la milliseconde. Un exemple, pris au sein des sources de nature électrique, est le condensateur.
- Les sources d'énergie à réponse non-immédiate. Ces dernières présentent un temps de réponse à la demande d'énergie de l'ordre de quelques secondes. Le délai peut être dû, par exemple, à une inertie dans la transformation de la nature de l'énergie qui est opérée par la source. Ce comportement peut être retrouvé dans les piles à combustible [22].
- Les sources d'énergie à réponse différée. Les délais imposés à ces sources peuvent être supérieurs à plusieurs minutes, voire plusieurs heures et dépendent en partie de l'inertie de la conversion d'énergie. Une seconde cause d'une réaction lente peut être le nombre et la complexité des auxiliaires de contrôle de la source d'énergie qui retardent la réponse de la conversion énergétique à proprement parler. Comme exemple, on peut mentionner la centrale nucléaire qui peut prendre plu-

sieurs heures afin de modifier son point de fonctionnement dans la conversion d'énergie qu'elle opère.

Dans certains cas, plusieurs types de sources sont combinées afin d'obtenir une réponse à une sollicitation en puissance plus rapide. On parlera alors de système hybride, qui sera décrit de manière extensive au chapitre 3.

2.4 ASSOCIATION DE DEUX SOURCES D'ÉNERGIE

Les caractéristiques et propriétés des sources ayant été mises en évidence dans les pages précédentes, il s'agit désormais d'étudier la possibilité d'association des sources en fonction de chacune de ces dernières. Pour chacune des propriétés, on établit les conditions nécessaires à l'association de deux sources.

2.4.1 *Forme de l'énergie*

Il paraît évident que l'association de sources d'énergie dont la forme d'interface n'est pas la même est impossible. Afin d'associer deux sources dont la forme d'interface est différente, il est nécessaire de faire usage d'un dispositif de conversion qui assure la conversion de l'énergie afin d'adapter sa forme. A titre d'exemple, le moteur à courant continu est un dispositif de conversion qui adapte les formes d'énergie électrique et mécanique.

Dès lors que ce critère est rempli, il est possible de connecter des sources, même si la forme de stockage de l'énergie stockée (s'il y a lieu) diffère, indépendamment des propriétés d'accumulateur ou d'interface.

2.4.2 *Flux d'énergie*

Dans le cas des systèmes composés de deux sources, les combinaisons qui permettent l'association sont :

- flux d'énergie sortant - entrant. Exemple : cellule photovoltaïque (sortant) connectée à une résistance électrique (entrant) ;
- flux d'énergie réversible - réversible. Exemple : réseau électrique domestique à une machine asynchrone ;
- flux d'énergie entrant - réversible contraint ;
- flux d'énergie réversible contraint - sortant.

Dans la première combinaison, l'usage de deux sources unidirectionnelles forme une association qui contraint complètement l'ensemble. Dans la seconde, l'usage de deux sources bidirectionnelles rend l'ensemble non contraint en terme de flux d'énergie. Par contre, les deux dernières impliquent que la source qui présente la propriété de flux d'énergie réversible soit contrainte par la seconde source du circuit. Ainsi, par assemblage, le flux d'énergie est contraint à être unidirectionnel dans les deux cas. Un exemple d'une connexion *entrant - réversible contraint* est présenté à la fig. 2.4 (a). La résistance est une source à flux d'énergie entrant (charge). Cette dernière contraint la source de gauche, une batterie, à fournir un flux d'énergie sortant. De la même manière,

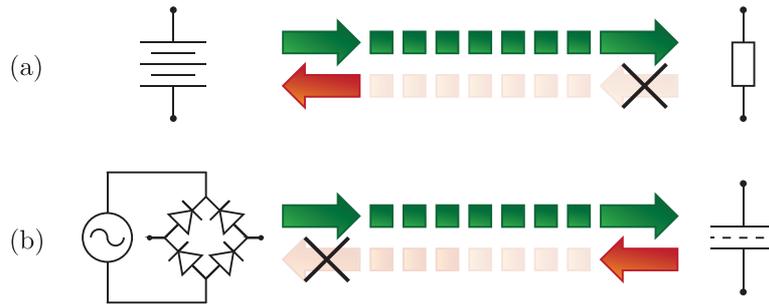


FIGURE 2.4 : Connexion de sources dont les flux d'énergie peuvent être qualifiés de (a) entrant - mixte contraint et (b) sortant - mixte contraint

sur la figure 2.4 (b) est présenté un exemple de connexion *sortant - réversible contraint* avec une source réseau redressée dont le flux d'énergie ne peut être que sortant et un supercondensateur dont le flux est ici contraint entrant.

2.4.3 Forme de la variable imposée

Le paragraphe 2.3.3 a mis en évidence trois catégories, pour ce qui est de la forme de la variable imposée par une source. En terme de combinaisons de deux sources, on considère les combinaisons suivantes qui autorisent la connexion directe de deux sources :

- source forte imposant la variable de type potentiel - faible. Exemple : source de tension - résistance électrique ;
- source forte imposant la variable de type débit - faible. Exemple : source de courant - résistance électrique ;
- source forte imposant la variable de type potentiel - source forte imposant la variable de type débit : Exemple : source de tension - source de courant ;

Le cas de l'association de deux sources fortes imposant le même type de variable ne permet pas l'association de ces dernières sans violer la notion de causalité du système.

2.4.4 Réponse temporelle

Le critère de la réponse ne donne pas de solution immédiate pour l'association des sources. A priori, l'association de deux sources à réponses non-égales ne contre-indique pas l'association de ces sources. Cependant, ce critère permettra de définir une fonctionnalité, nécessaire ou non, proposée par l'association de deux sources.

2.5 ALIMENTATION DE CHARGES USUELLES

Plus haut ont été classifiées les différentes sources d'énergie en fonction des caractéristiques qu'elles présentent : nature, forme, temps de réponse, direction de flux d'éner-

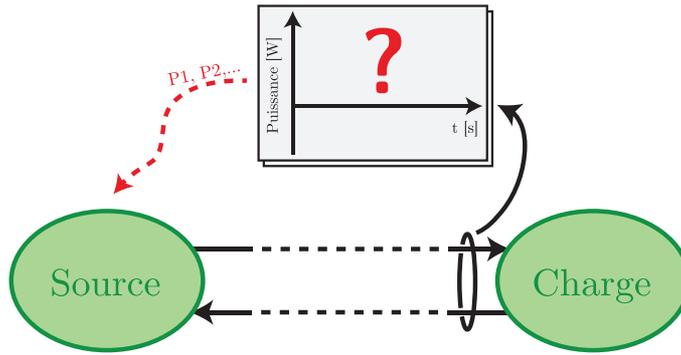


FIGURE 2.5 : Dimensionnement de source en fonction des propriétés de la charge

gie, etc. Cette dernière caractéristique a permis de mettre en évidence la capacité d'une source à être génératrice/consommatrice ou de pouvoir présenter les deux propriétés. L'intérêt des prochaines lignes est, dans un premier temps, de classifier et de modéliser le comportement de charges usuelles. Ensuite, selon la figure 2.5, certaines propriétés des modèles de charges seront réutilisées afin de définir les caractéristiques que doit proposer une source qui permette l'alimentation d'une charge.

2.5.1 Modélisation de contraintes en puissance

Une manière de classifier les charges, électriques ou non, est de les classer en fonction du profil de puissance qui peut être mesuré à leur bornes. L'éventail est large, de la charge dont la puissance est constante à celle dont le comportement peut être qualifié de stochastique. On considère ici des sources dont la consommation peut être aisément représentée, dont le comportement peut être qualifié de périodique. La figure 2.6 présente les 4 cas qui seront traités dans les lignes qui suivent.

2.5.1.1 Charge unidirectionnelle à puissance constante

Le cas le plus simple, dont la puissance aux bornes est représentée en figure 2.6 (a), consiste en la modélisation d'une charge à puissance constante. Cette dernière est caractérisée par la valeur maximale de la puissance instantanée prélevée par la source $\max(P_{in}) = P_L$. Par définition, la puissance moyenne consommée est elle aussi définie par $\langle P_{in} \rangle = P_L$. Etant donné la puissance constante consommée par ce type de charge, il va de soi que les valeurs maximales et moyennes sont égales.

2.5.1.2 Charge unidirectionnelle intermittente

La charge dont le flux de puissance est unidirectionnel et intermittent est représentée en figure 2.6 (b). Il est assumé que le comportement intermittent de la charge est défini par sa fréquence f_i (ou sa période T_i). On définit aussi le rapport cyclique d'enclenchement D comme suit :

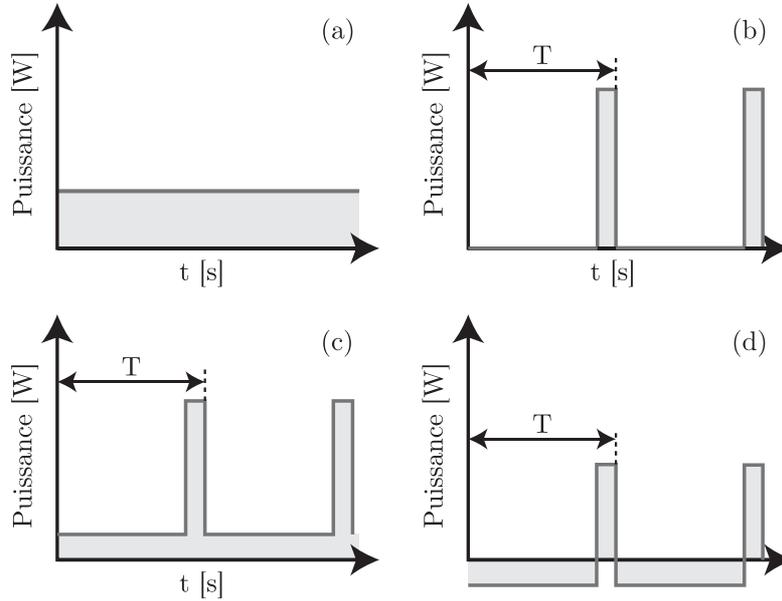


FIGURE 2.6 : Charges usuelles dont le comportement est modélisé

- Durant l'intervalle $0 \leq t < (1 - D)T_i$, la puissance consommée par la charge est nulle ;
- Durant l'intervalle $(1 - D)T_i \leq t < T_i$, la puissance consommée par la charge vaut P_{L2} .

De cette manière, il est possible de définir les éléments qui caractérisent le fonctionnement de cette charge sur une période ; en premier lieu, la puissance maximale vue aux bornes de la charge vaut $\max(P_{in}) = P_{L2}$. La puissance moyenne consommée par la charge est définie par la relation $\langle P_{in} \rangle = DP_{L2}$.

2.5.1.3 Charge unidirectionnelle à paliers de puissance

Similaire au cas précédent, le comportement de cette charge est représenté en figure 2.6 (c). Avec pour hypothèse que $P_{L1} < P_{L2}$, la puissance consommée par cette dernière est définie ainsi :

- Durant l'intervalle $0 \leq t < (1 - D)T_i$, la puissance consommée par la charge vaut P_{L1} ;
- Durant l'intervalle $(1 - D)T_i \leq t < T_i$, la puissance consommée par la charge vaut P_{L2} .

De la même manière à ce qui a été fait plus haut, la puissance maximale prélevée par la charge est $\max(P_{in}) = P_{L2}$, et la puissance moyenne est définie comme $\langle P_{in} \rangle = (1 - D)P_{L1} + DP_{L2}$.

2.5.1.4 Charge réversible à paliers de puissance

De manière plus générale que pour la charge précédente, l'intérêt se porte ici sur une source dont le flux de puissance est réversible. Représenté en figure 2.6 (d), son comportement peut être décrit de la manière suivante :

- Durant l'intervalle $0 \leq t < (1 - D)T_i$, la puissance générée par la charge vaut P_{L1} ;
- Durant l'intervalle $(1 - D)T_i \leq t < T_i$, la puissance consommée par la charge vaut P_{L2} .

La puissance instantanée maximale mesurée aux bornes de la source se définit $\max(P_{in}) = \max(-P_{L1}, P_{L2})$. La puissance moyenne mesurable aux bornes de la source est $\langle P_{in} \rangle = (D - 1)P_{L1} + DP_{L2}$. Il reste à noter que la puissance moyenne peut être positive, le comportement macroscopique est alors une charge, ou négative, et le comportement sur l'échelle de la période est celui de générateur. La condition qui garantit que le comportement à l'échelle de la période de la source soit de type charge (consomme de l'énergie) est définie par $P_{L1} < \frac{P_{L2}D}{(1-D)}$.

2.5.2 Critères de dimensionnement d'alimentation

Dès lors que la charge à alimenter est modélisée, la question qui se pose porte sur le dimensionnement de l'étage d'alimentation. On rappelle que le but est d'alimenter une charge dont le modèle a été décrit ci-dessus directement par une source compatible, sans aucun élément intermédiaire. Ceci est réalisé sans aucune considération sur la période de fonctionnement de la charge, identifiée lors de la modélisation de ces dernières.

Ainsi, de manière classique, et au-delà des critères d'association présentés au point 2.4 considérés comme acquis, le dimensionnement d'une source se repose principalement sur l'adéquation aux critères suivants :

- La puissance maximale que la source d'énergie peut fournir ou éventuellement absorber. Afin de garantir la compatibilité entre une charge et une source, la puissance disponible doit être supérieure à celle demandée par la charge, définie plus haut comme $\max(P_{in})$.
- La quantité d'énergie que l'accumulateur est capable de fournir. Cette dernière, W_0 , doit être supérieure à celle qui est nécessaire pour alimenter la charge durant sa durée minimale de fonctionnement t_{life} . Ainsi, la condition est formulée ainsi : $W_0 = t_{life} \langle P_{in} \rangle$.

Dès lors que ces critères sont satisfaits, un ensemble d'accumulateurs peut être candidat à l'alimentation de la charge considérée. La figure 2.7 présente, sur un plan puissance/énergie proche de la représentation de Ragone [23, 24], les 4 domaines délimités par les contraintes en énergie et en puissance mentionnées ci-dessus. Pour chacun de ces domaines, on note :

INFÉRIEUR GAUCHE. Pour tous les points situés dans ce quadrant, aucun des critères n'est satisfait : la quantité d'énergie fournie par l'accumulateur est insuffisante pour garantir l'autonomie de la charge à alimenter ;

INFÉRIEUR DROIT. Bien que la puissance maximale demandée par l'application soit disponible, le contenu énergétique de la source est insuffisant ;

SUPÉRIEUR GAUCHE. Dans ce cas, l'énergie nécessaire au fonctionnement de la charge est disponible, mais la puissance maximale ne peut être garantie ;

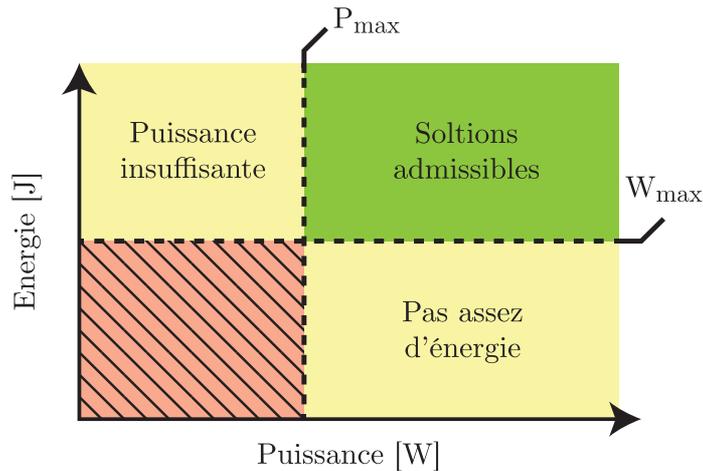


FIGURE 2.7 : Contraintes de dimensionnement dans le plan énergie/puissance

SUPÉRIEUR DROIT. Ce quadrant recense toutes les solutions qui satisfont les contraintes d'alimentation de la charge.

2.6 ACCUMULATEURS, ÉNERGIE ET ALIMENTATION

Les modèles de charges présentés lors de la section précédente ont permis de définir des contraintes qui doivent être satisfaites par la source, afin de garantir l'alimentation de ces dernières. Le choix d'une source n'est pas complètement fixé à l'aide des contraintes de la charge. En effet, en fonction de la sollicitation en puissance qu'impose la charge à la source, le rendement de l'opération peut être affecté.

Les prochains paragraphes souhaitent mettre en évidence l'impact du type de la charge sur le rendement de l'extraction de l'énergie. Pour ce faire, une représentation du rendement d'extraction sera proposée. Dans un second temps, à l'aide d'un modèle générique d'accumulateur, les caractéristiques offertes par l'accumulateur seront mises en évidence vis-à-vis de la sollicitation en puissance de ce dernier par la charge.

2.6.1 Diagramme de Ragone

Pour un accumulateur donné, il est intéressant de pouvoir représenter ses caractéristiques principales, notamment la quantité d'énergie qui peut être extraite de ce dernier, en fonction de sa sollicitation en puissance. Pour ce faire, il est suggéré de faire usage d'une représentation proche de celle du diagramme de Ragone [23]. Depuis plusieurs années, ce type de représentation est utilisé afin de comparer les performances des classes d'accumulateurs en termes de densité d'énergie et de densité de puissance. La figure 2.8 laisse entrevoir une présentation classique du plan de Ragone qui permet la comparaison des accumulateurs, dont les caractéristiques sont recensées en [25].

Sur ce type de représentation, les caractéristiques des accumulateurs sont présentées sous forme de surface ou de front de performance. Dans la figure 2.8, il est possible de

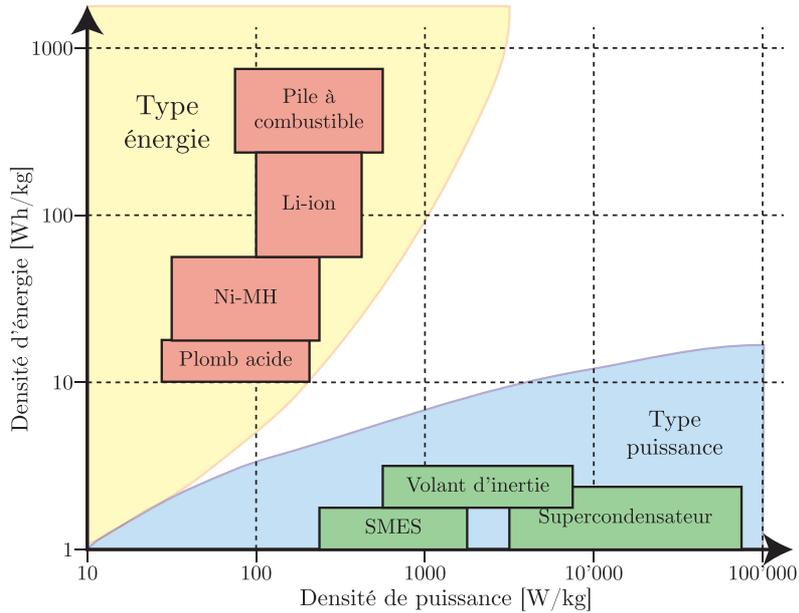


FIGURE 2.8 : Comparaison des types d'accumulateurs via une représentation de Ragone

mettre en évidence deux classes d'accumulateurs. La première regroupe les éléments qualifiés d'accumulateurs de *type énergie*, tels les accumulateurs électrochimiques. Ces derniers offrent une densité d'énergie élevée, mais une densité de puissance faible ; ils sont regroupés le long de l'axe vertical. Le second groupe rassemble les accumulateurs de *type puissance*, tel le condensateur électrique, qui proposent une densité en puissance élevée à défaut d'une faible densité de puissance. Cette classification est unanimement reprise par la communauté scientifique lors des études de systèmes de stockage de l'énergie [22].

2.6.1.1 Représentation modifiée de Ragone

La variante dont l'usage va être fait par la suite, illustrée en figure 2.9, présente le comportement d'un accumulateur unique en fonction de la puissance constante prélevée. Une approche similaire, mais normalisée, a été proposée dans [24]. Dans le cas qui nous intéresse, la caractéristique de l'accumulateur est présentée par la courbe bleue de la figure 2.9. Chaque point de la courbe lie la quantité d'énergie qu'il est possible d'extraire de l'accumulateur durant un cycle de décharge complet à la puissance qui est imposée par la charge durant un cycle de décharge complet.

Si on considère la fonction générique présentée dans la figure précédente, les remarques suivantes peuvent être formulées :

- A faible puissance, la quantité d'énergie qui peut être extraite de l'accumulateur est faible. Lorsque la puissance croît, dans un premier temps, l'énergie qui peut être extraite de l'accumulateur suit la même tendance. Cette caractéristique est expliquée par l'auto-décharge de l'accumulateur ;
- Au fur et à mesure que la puissance croît, l'augmentation relative de l'énergie extraite (pente de la courbe) diminue jusqu'à atteindre le point le plus haut de la courbe. Il s'agit là de la quantité maximale d'énergie extractible de l'accumulateur ;

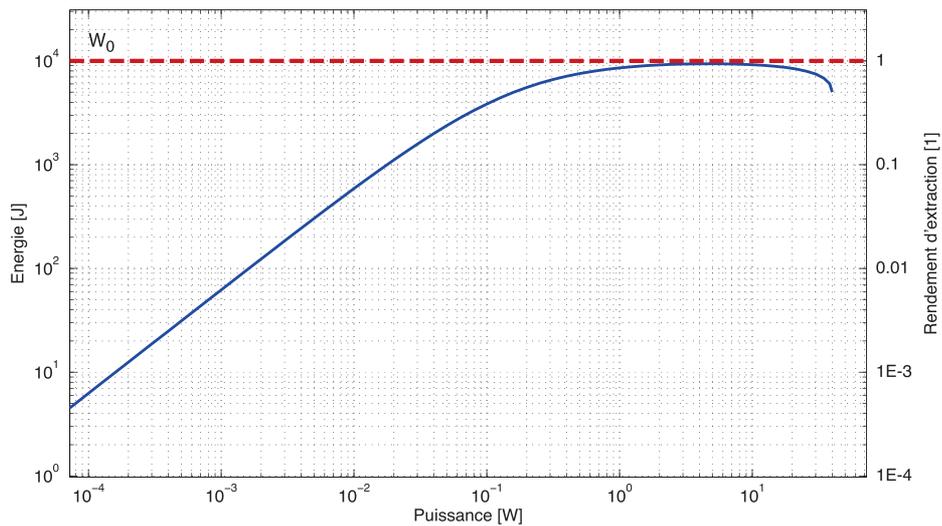


FIGURE 2.9 : Représentation de Ragone modifiée du comportement d'un accumulateur type

- Passé ce point, la quantité d'énergie qu'il est possible d'extraire diminue, due à la présence de pertes proportionnelles à la sollicitation en puissance de l'accumulateur.
- Finalement, le point qui présente la quantité maximale de puissance extractible de l'accumulateur est atteint ; l'accumulateur n'est pas capable de délivrer plus de puissance.

Dans tous les cas, l'énergie extractible de l'accumulateur dépend de deux facteurs. Le premier est évidemment lié à la nature de l'accumulateur et au modèle utilisé pour représenter son comportement. Le second est lié au type de sollicitation en puissance de la source. En effet, il paraît clair que la quantité d'énergie extractible dépend de l'amplitude de la puissance extraite, mais aussi de l'évolution temporelle de cette dernière. Le paragraphe 2.6.3 examinera en détail, pour chaque modèle de charge proposé au § 2.5.1, la quantité qu'il est possible d'extraire de la source.

Sur la figure 2.9, l'énergie stockée au sein de l'accumulateur est indiquée par le trait rouge. De cette manière, pour chaque point de fonctionnement, la représentation proposée offre une possibilité visuelle d'identifier le rendement de l'extraction, défini comme la quantité d'énergie extraite rapportée à celle stockée.

2.6.2 Modèle d'accumulateur de type électrique

Afin de pouvoir, dans la section suivante, comparer l'énergie extractible pour chaque modèle de charge, il est nécessaire de proposer un modèle générique d'accumulateur qui permette de mettre en évidence les pertes énergétiques. L'évaluation des performances du tandem source-charge pourra ensuite être représentée par le biais du diagramme modifié de Ragone introduit ci-dessus. La figure 2.10 présente le modèle d'accumulateur qui est proposé. Il a été choisi de faire usage d'un modèle électrique équivalent, afin de permettre une meilleure compréhension des phénomènes. Ce dernier est défini par 4 paramètres :

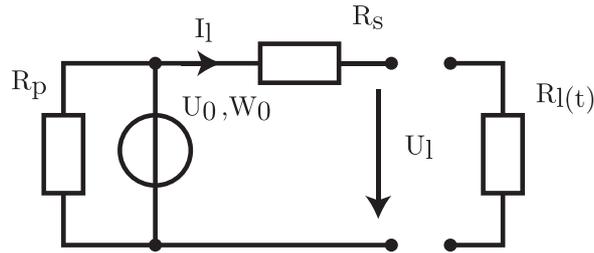


FIGURE 2.10 : Modèle générique d'accumulateur

- La tension à vide, dont la valeur est constante, U_0 ;
- La quantité d'énergie stockée W_0 ;
- La résistance parallèle R_p modélisant l'auto-décharge de l'accumulateur ;
- La résistance série R_s modélisant la limite de puissance extractible.

La figure 2.11 représente les caractéristiques propres du modèle, représentées sur un plan dont seule l'échelle de l'abscisse est logarithmique. Afin d'obtenir chaque point d'une caractéristique, le comportement du modèle est évalué successivement pour un courant I_l dont l'amplitude varie entre une valeur nulle (le point le plus à gauche) et le courant de court circuit, défini par U_0/R_s . De cette figure, on note l'influence des différents paramètres du modèle sur la quantité d'énergie extractible de l'accumulateur.

Par rapport à la représentation qui a été introduite plus tôt (figure 2.9), on note que pour certains points de la courbe, il existe deux solutions d'énergie extractible par puissance imposée à l'accumulateur. Ce repli de la courbe d'énergie disponible, situé au-delà du point de puissance maximale, est expliqué par l'examen de l'équation régissant le lien entre courant extrait et puissance :

$$P_L - U_0 I_s + R_s I_s^2 = 0 \quad (2.8)$$

Ainsi, pour une puissance donnée il existe deux solutions en courant. La première, à courant faible et tension appliquée à la charge élevée, permet l'extraction de puissance sous un bon rendement et, pour cette raison, est privilégiée. La seconde solution, où le courant est proche du courant de court-circuit et la tension U_L est faible, permet l'extraction de la même puissance sous des conditions de rendements beaucoup plus faibles, où la plus grande partie de l'énergie est dissipée dans l'élément R_s .

2.6.2.1 Modélisation d'accumulateurs type énergie et puissance

Le comportement des deux classes d'accumulateurs mentionnés au § 2.6.1 doit pouvoir être mis en exergue par le modèle proposé. Ainsi, pour chacun des critères qui définissent cette classification puissance/énergie, les contraintes sur le modèle sont formulées :

- L'accumulateur de type énergie se distingue de l'accumulateur type puissance par une quantité d'énergie stockée W_0 plus élevée, sous hypothèse que le poids des accumulateurs est du même ordre de grandeur ;
- A l'inverse, l'accumulateur de type puissance se distingue du fait que la puissance extractible (le point le plus à droite de la représentation modifiée) est plus importante que celle de l'accumulateur type énergie.

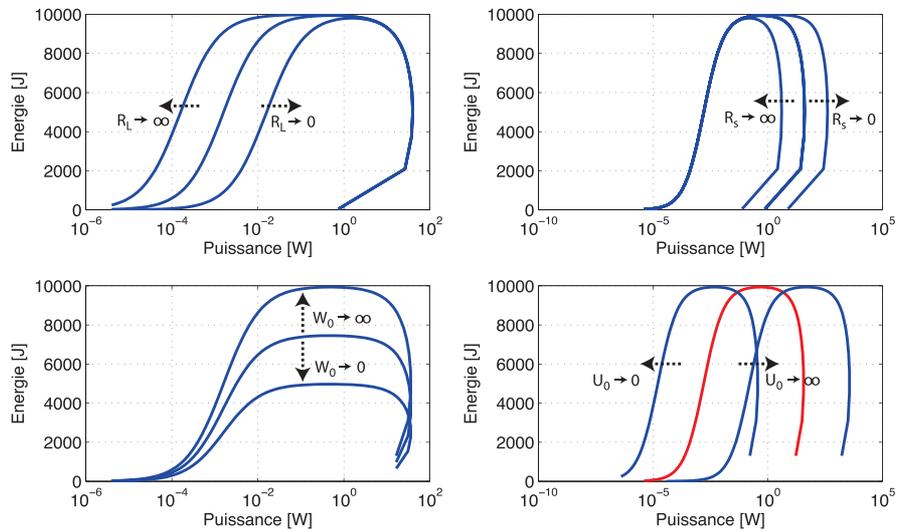


FIGURE 2.11 : Comportement du modèle dans la représentation de Ragone modifiée

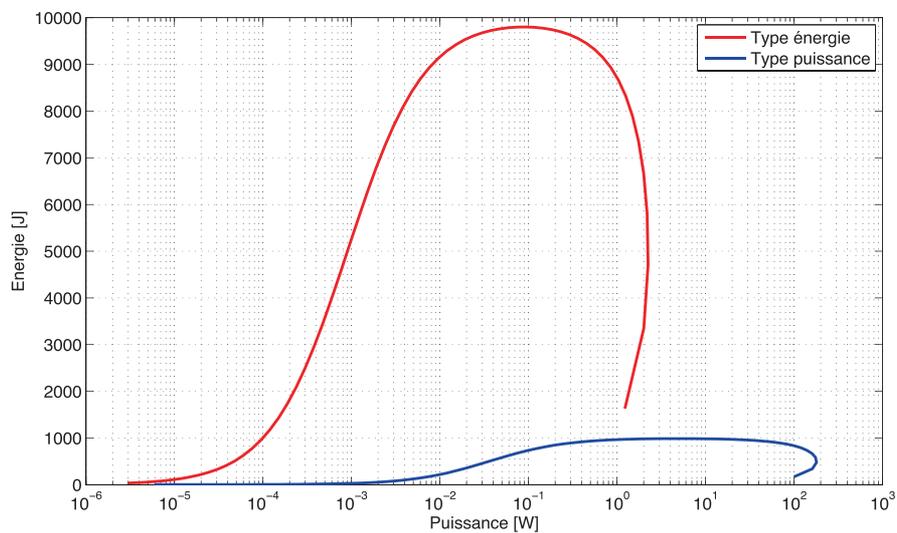


FIGURE 2.12 : Modèle d'accumulateurs type puissance et énergie

La figure 2.12 montre, à l'aide de la représentation modifiée de Ragone, le comportement d'un accumulateur de chaque type, modélisé de la façon décrite ci-dessus. Un supercondensateur et un accumulateur nickel-métal de poids similaire ont été choisis pour l'exemple. La puissance maximale du premier est dix fois supérieure à celle du second, alors que c'est l'inverse pour l'énergie extractible maximale.

2.6.2.2 Extension du modèle aux systèmes non-électriques

Le modèle proposé sous une représentation électrique peut aisément être transposé aux systèmes de nature différente. Pour ce faire, il est nécessaire d'exprimer les pertes du modèle en fonction de la puissance requise par la charge P_L , et des paramètres du modèle. En procédant de la sorte, la définition des pertes au sein des résistances parallèle (P_p) et série (P_s) peut être exprimée de la façon suivante :

$$P_p = \frac{U_0^2}{R_p} \quad (2.9)$$

$$P_s = \frac{1}{2R_s} U_0 \left(U_0 - \sqrt{U_0^2 - 4P_L R_s} \right) - P_L \quad (2.10)$$

2.6.3 Représentation de l'énergie disponible

Dans les lignes qui suivent, le modèle d'accumulateur va être virtuellement connecté aux modèles de charges présentées au § 2.5.1. A la différence de la représentation modifiée de Ragone proposée par [24], la caractérisation de l'accumulateur ne sera pas faite uniquement sous des conditions de puissance constante, mais les intermittents seront aussi abordés. Ceci permettra de mettre en évidence les implications sur le rendement d'extraction qu'ont les différents modèles de charge, ainsi que les limites en puissance et en énergie imposées par les différentes sollicitations de l'accumulateur.

2.6.3.1 Unidirectionnelle à puissance constante

Le modèle de consommation présenté au § 2.5.1.1 décrit le profil de puissance de la charge qui est alimentée par le modèle d'accumulateur introduit ci-dessus. Par (2.10), l'énergie extractible en fonction de la puissance P_L est donnée par la relation :

$$\begin{aligned} W_{utile1} &= P_L \frac{W_0}{P_s + P_L + P_p} \\ &= \frac{P_L}{U_0} \frac{2R_s W_0}{U_0 \left(1 + \frac{2R_s}{R_p} \right) - \sqrt{U_0^2 - 4R_s P_L}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Pour ce modèle simple dont l'énergie disponible ne dépend que de la puissance requise par la charge, la représentation de l'énergie extractible est similaire à celle proposée en figure 2.12. La puissance maximale extractible est définie par la relation $\max(P_L) = \frac{U_0^2}{4R_s}$.

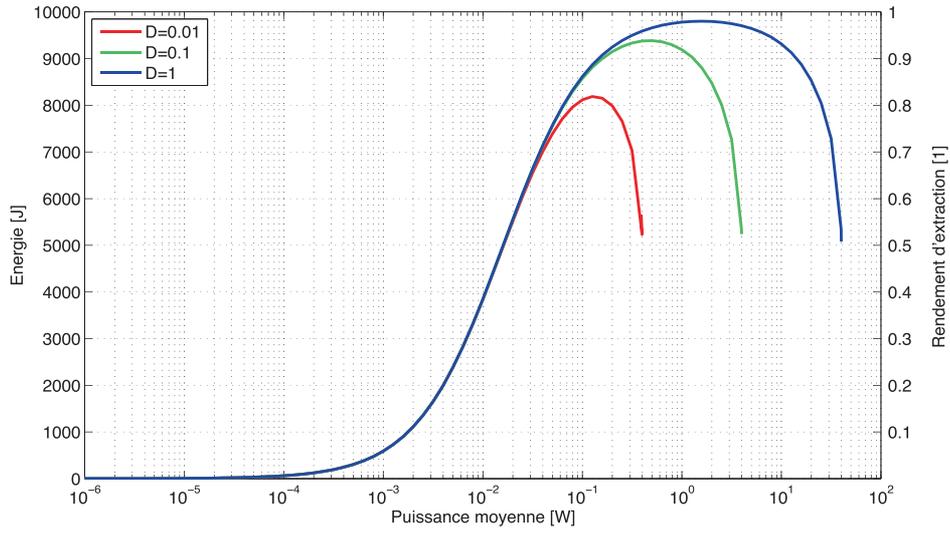


FIGURE 2.13 : Energie disponible pour une charge intermittente en fonction du rapport cyclique

2.6.3.2 Unidirectionnelle intermittente

Le second modèle de charge, développé au § 2.5.1.2 et repris ici, consiste en une charge intermittente, dont les caractéristiques sont la puissance moyenne $\langle P_L \rangle$ ainsi que le rapport cyclique d'enclenchement D . L'énergie qui est délivrée par l'accumulateur en fonction de ces deux paramètres s'exprime par :

$$\begin{aligned}
 W_{utile2} &= DP_{L1} \frac{W_0}{P_p + D(P_s(P_{L1}) + P_{L1})} \\
 &= \frac{2P_{L1}R_sW_0}{U_0 \left[U_o \left(1 + \frac{2R_s}{R_p D} \right) - \sqrt{U_0^2 - 4P_{L1}R_s} \right]} \\
 &= \frac{2 \langle P_L \rangle R_s W_0}{DU_0 \left[U_o \left(1 + \frac{2R_s}{R_p D} \right) - \sqrt{U_0^2 - 4 \frac{\langle P_L \rangle R_s}{D}} \right]} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

La dépendance de la puissance moyenne ainsi que l'influence du rapport cyclique sont représentés en figure 2.13. La puissance moyenne maximale extractible est définie par la relation $\max(\langle P_L \rangle) = D \frac{U_0^2}{4R_s}$. L'observation attentive de cette figure permet de constater que plus le rapport cyclique est faible, plus la puissance moyenne qu'il est possible d'extraire est faible. De manière analogue, plus le rapport cyclique est faible, moins bon est le rendement d'extraction. Le corollaire à cela est que la quantité d'énergie extractible diminue avec le rapport cyclique.

2.6.3.3 Unidirectionnelle à paliers de puissance

Le troisième modèle, développé au § 2.5.1.3, est similaire au cas précédent, à la différence près que sa consommation est caractérisée par deux paliers de puissance P_{L1} et P_{L2} de valeur non nulle. La définition de l'énergie disponible aux bornes d'un

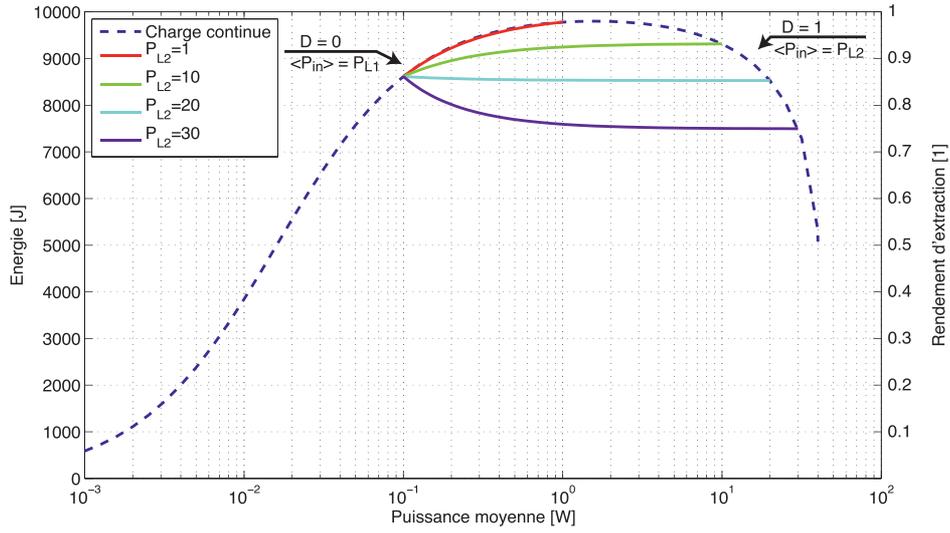


FIGURE 2.14 : Energie disponible pour une charge unidirectionnelle à paliers $P_{L1} = 0.1$

accumulateur alimentant ce type de charge dépend de trois paramètres : la puissance minimale consommée par la charge P_{L1} , le rapport cyclique d'enclenchement D , ainsi que la puissance moyenne consommée $\langle P_L \rangle$. Par un raisonnement similaire à celui utilisé pour les cas précédents, l'énergie délivrée par l'accumulateur est :

$$\begin{aligned}
 W_{utile3} &= \frac{W_0 ((1 - D) P_{L1} + D P_{L2})}{P_p + (1 - D) (P_s(P_{L1}) + P_{L1}) + D (P_s(P_{L2}) + P_{L2})} \quad (2.13) \\
 &= \frac{2 \langle P_L \rangle W_0 R_s}{U_0 \left[U_0 \left(1 + \frac{2R_s}{R_p} \right) - (1 - D) \sqrt{U_0^2 - 4R_s P_{L1}} - D \sqrt{U_0^2 - 4R_s P_{L2}} \right]} \\
 \text{avec } P_{L2} &= \frac{\langle P_L \rangle - (1 - D) P_{L1}}{D}
 \end{aligned}$$

De la même manière que pour les expressions précédentes, le maximum de la puissance moyenne qu'il est possible d'extraire de l'accumulateur sous cette configuration est définie par la relation $max(\langle P_L \rangle) = D \frac{U_0^2}{4R_s} + (1 - D) P_{L1}$. La figure 2.14 met en évidence l'énergie extractible de l'accumulateur dans cette configuration.

Sur cette dernière, l'évolution du rendement d'extraction est présentée. A titre de référence, la caractéristique obtenue par le modèle dont la puissance consommée est constante est représentée en pointillés. Chaque courbe est obtenue par variation du rapport cyclique d'enclenchement pour des paliers de puissance dont la valeur est fixée.

Ainsi, le point le plus à gauche de la représentation est défini par le rapport cyclique de valeur nulle ; la puissance moyenne, pour chaque source vaut alors P_{L1} . Plus le rapport cyclique augmente, puis la puissance moyenne consommée par la charge tend vers la valeur P_{L2} . On relève que l'évolution du rendement d'extraction dépend des valeurs des paliers de puissance, même lorsque la puissance moyenne est très différente de ces derniers.

2.6.3.4 Réversible à paliers de puissance

Le dernier modèle de charge, développé au § 2.5.1.4, est similaire au cas précédent, à la différence près que le flux de puissance est bidirectionnel entre l'accumulateur et la charge.

La définition de l'énergie disponible aux bornes d'un accumulateur alimentant ce type de charge dépend de trois paramètres : la puissance P_{L2} consommée par la charge, la puissance P_{L1} générée par la charge et le rapport cyclique d'enclenchement D . Le comportement macroscopique de la charge est défini par la puissance moyenne consommée $\langle P_L \rangle$. L'hypothèse d'un comportement macroscopique de type charge est suggérée, afin de ne considérer que les conditions qui garantissent que la puissance moyenne aux bornes de la charge soit positive :

$$-(1 - D) P_{L1} < DP_{L2} \quad (2.14)$$

Il est intéressant de dissocier cette condition qui porte sur l'énergie transférée de celle qui contraint l'accumulateur à se voir être déchargé. En effet, étant donné les pertes dont le modèle de charge tient compte, l'accumulateur se décharge même si la puissance moyenne consommée $\langle P_L \rangle$ est nulle. La condition qui assure la décharge de l'accumulateur est posée :

$$W_{L1} + W_{L2} > 0 \quad (2.15)$$

De cette condition, en tenant compte des signes (P_{L1} et W_{L1} négatifs, P_{L2} et W_{L2} positifs), la limite qui garantit la décharge de l'accumulateur peut être définie par :

$$U_0 \left(\frac{2R_s}{R_p} + 1 \right) = D \sqrt{U_0^2 - 4R_s P_{L2}} + (1 - D) \sqrt{U_0^2 - 4R_s P_{L1}} \quad (2.16)$$

Il est dès lors possible d'obtenir la quantité d'énergie utile à la charge, issue de l'accumulateur, par la relation (2.13). De la même manière que pour les expressions précédentes, la puissance moyenne maximale qu'il est possible d'extraire de l'accumulateur sous cette configuration est définie par la relation $\max(\langle P_L \rangle) = D \frac{U_0^2}{4R_s} + (1 - D) P_{L1}$.

La figure 2.15 met en évidence l'énergie extractible de l'accumulateur dans cette configuration. Pour chacun des cas représentés, la valeur des seuils de puissance est imposée, et seul le rapport cyclique d'enclenchement varie entre la valeur minimale définie par la relation (2.14) et 1. Afin de rendre plus explicite la représentation, la caractéristique obtenue par le modèle dont la puissance consommée est constante est présentée en pointillés.

L'augmentation de la valeur de puissance P_{L2} implique un rendement d'extraction (ou une quantité d'énergie extraite de l'accumulateur) plus faible. Ceci se justifie par la valeur plus faible du rapport cyclique D qui doit être appliquée afin de conserver la puissance moyenne égale. L'augmentation (en valeur absolue) de la puissance P_{L1} qui est fournie à l'accumulateur par la charge implique une baisse du rendement d'extraction. Dans ce cas, pour une consommation similaire de la charge, un transfert inutile d'énergie entre la source s'installe et la charge. Les pertes dues à ce transfert engendrent cette baisse de rendement.

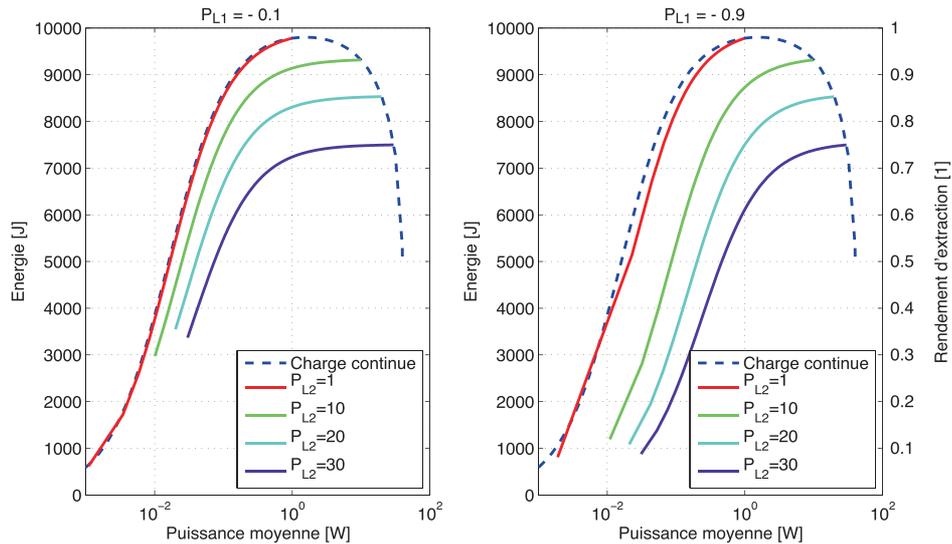


FIGURE 2.15 : Energie disponible pour une charge bidirectionnelle

2.6.4 Commentaires sur l'impact de la sollicitation en énergie

Les paragraphes précédents ont permis de mettre en évidence la quantité d'énergie qu'il est possible d'extraire d'un accumulateur, en fonction de la charge connectée à ce dernier. Le modèle d'accumulateur qui a été mis en oeuvre pour cette comparaison est certes simple, mais ce dernier permet de mettre en évidence les phénomènes communs à la majorité des systèmes de stockage : l'auto-décharge et la limite de puissance extractible.

L'analyse des sollicitations des 4 différents types de charge a permis de mettre en évidence l'intérêt de la première solution. En effet, l'extraction d'énergie sous une puissance constante permet d'obtenir un meilleur rendement à la décharge que dans les autres cas où la sollicitation est intermittente. Dans ces derniers, pour une puissance moyenne similaire, les pertes par conduction dans la résistance série (P_s) sont accrues du fait de la puissance instantanée plus importante.

2.7 ALIMENTATION DE SYSTÈMES RÉELS

2.7.1 Sur-dimensionnement

L'alimentation de systèmes par des accumulateurs réels implique des problématiques diverses. Premièrement, comme le présente la figure 2.16, les dispositifs de stockage de l'énergie disponibles sur le marché ne présentent pas forcément les caractéristiques en énergie et en puissance requises par la charge. Une combinaison d'accumulateurs peut être nécessaire afin de les obtenir, et ainsi de permettre l'alimentation du système sous les contraintes formulées.

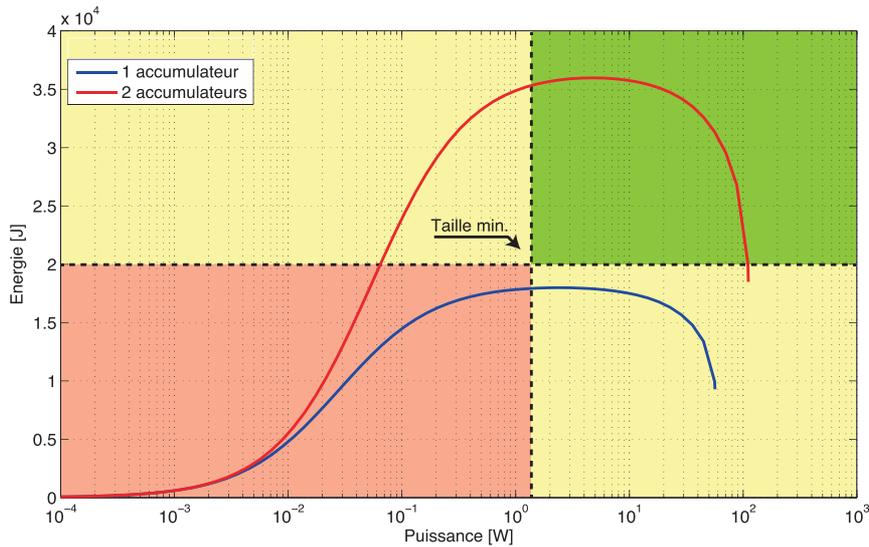


FIGURE 2.16 : Dimensionnement d'un accumulateur réel

Deuxièmement, l'accumulateur adapté à la situation est parfois sur-dimensionné par rapport aux besoins. En effet, le quadrant qui contient les solutions réalisables pour l'alimentation d'une charge présente deux degrés de liberté qui sont l'énergie embarquée et la puissance maximale disponible. L'unique solution qui conjugue la satisfaction stricte des exigences et un poids d'accumulateur minimal est définie par l'intersection des contraintes de puissance (verticale) et d'énergie (horizontale). Toutes les autres solutions sont surdimensionnées en énergie ou en puissance.

Finalement, comme il a été démontré au cours de la section 2.6.3, une sollicitation intermittente de l'accumulateur implique un rendement d'extraction plus faible et ainsi de l'obligation de surdimensionner l'accumulateur en énergie stockée, comme le montre la figure 2.17. Cette dernière représente le rendement d'extraction d'un accumulateur dont la sollicitation en puissance est, dans le premier cas, continue, et dans le second intermittente. Pour une même puissance moyenne, il est démontré que l'accumulateur sollicité par une puissance constante satisfait aux exigences, tandis que ce n'est pas le cas lorsque la sollicitation est intermittente.

2.7.2 Non-réversibilité des flux d'énergie

Le paragraphe 2.6.3.4 a présenté le rendement d'extraction de l'alimentation dont le flux d'énergie est réversible. Dans ce cas, il a été supposé que la source soit, elle aussi, réversible. Bien qu'il ait été démontré que les déstockages et stockages successifs de l'énergie nuisent au rendement d'extraction, une telle combinaison permet de stocker à nouveau une partie de l'énergie qui est restituée par la charge.

Dans un cas réel, la réversibilité de la source n'est pas nécessairement acquise ; il est alors nécessaire de dissiper l'énergie issue d'un tel type de charge, à défaut de pouvoir la stocker. L'exemple du véhicule mû par un moteur à combustion interne illustre tout

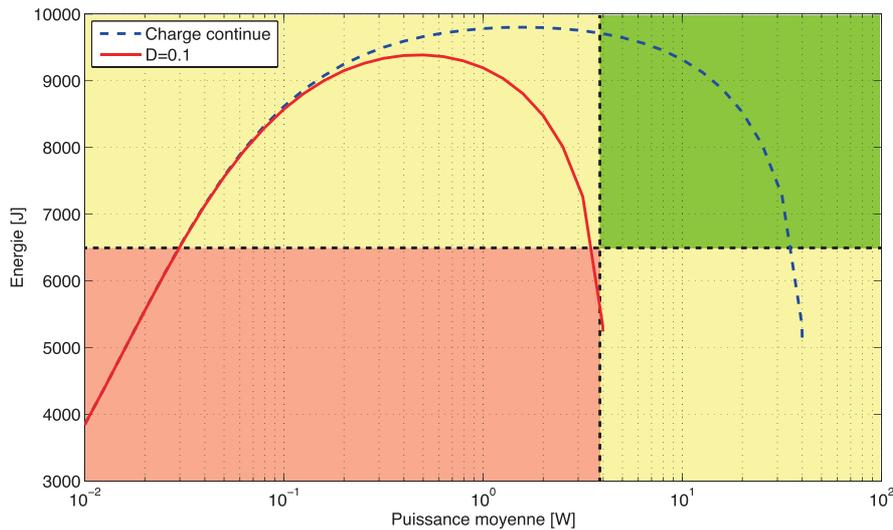


FIGURE 2.17 : Sur-dimensionnement nécessaire d'un accumulateur sollicité de façon intermittente

à fait ce propos (figure 1.9 page 12). La source d'énergie (moteur) étant non réversible, l'énergie qui pourrait être récupérée lors du freinage doit alors être dissipée.

2.8 SYNTHÈSE

Après avoir défini les termes nécessaires à la compréhension de la problématique, ce chapitre s'est axé, dans un premiers temps, sur la mise en évidence des diverses propriétés des sources d'énergie. La connaissance de ces dernières a permis une classification des sources d'énergie : réversibilité, stockage, etc.

Dans un second temps, des règles d'association de deux sources ont été proposées. Ainsi, dans un schéma simple de connexion directe de deux sources d'énergie, des règles ont été mises en évidence, dans le but d'autoriser ou d'infirmer la possibilité de connecter les sources, en fonction de leurs propriétés qui ont été décrites au préalable.

Dès lors que la connexion entre deux sources est permise, l'intérêt s'est porté sur le rendement de l'alimentation d'une source de type charge par une source de type accumulateur. Pour ce faire, il a été tout d'abord question de modéliser le comportement de 4 types de charges, en fonction du profil de puissance qu'elles imposent. De la charge classique dont la puissance consommée est constante à la charge proposant une faible réversibilité en puissance, les 4 cas ont été caractérisés par un comportement périodique et les paramètres associés à ce dernier.

Dans un second temps, un modèle de source a été proposé ; ce dernier tient compte des 2 postes de pertes classiquement attribués au fonctionnement des accumulateurs. Une représentation des performances de l'accumulateur a été proposée. Cette dernière a ensuite été utilisée afin de caractériser la qualité de l'extraction de l'énergie de la source, en fonction de chaque type de charge modélisé au préalable. Il a été mis en

avant qu'une sollicitation intermittente de l'accumulateur diminue fortement le rendement d'extraction de l'énergie.

Finalement, en partant de cet acquis, des remarques quant à l'alimentation d'une charge par un accumulateur réel ont été mises en avant. D'une part, un surdimensionnement de ce dernier est souvent inévitable. Les raisons peuvent être multiples : caractéristiques des accumulateurs incompatibles, sollicitation intermittente de la charge, etc. D'autre part, la réversibilité des flux d'énergie n'est pas systématiquement acquise dans le cadre d'une alimentation directe ; cette situation peut entraîner un gaspillage d'énergie lorsque celle-ci ne peut pas être absorbée par la source.

Au terme de ce chapitre, au-delà d'une simple classification des sources d'énergie, des outils nécessaires aux développements à venir ont été exposés. A l'aide de ces derniers, la compréhension de l'alimentation directe a permis de mettre en évidence les problèmes que celle-ci peut impliquer, en fonction du type de charge à alimenter.

Troisième partie

STOCKAGE HYBRIDE

L'approche d'une chaîne d'alimentation énergétique étant abordée, les notions de sur-dimensionnement d'accumulateurs ont pu être mises en évidence. Avec pour but, pas unique, de pallier à ce dernier aspect, la notion de stockage hybride peut être introduite dans cette partie.

STOCKAGE HYBRIDE

3.1 OBJECTIFS

Au cours des chapitres précédents, des outils ont été présentés et l'alimentation en énergie d'un dispositif électrique a été décrite. Le dimensionnement des accumulateurs qui a été abordé alors a permis de mettre en évidence la problématique de l'alimentation directe. Il a été démontré, par exemple, que l'alimentation directe de charges intermittentes peut impliquer un sur-dimensionnement de l'accumulateur. Ce chapitre va s'atteler à résoudre ce type de problème via l'usage de solutions hybrides.

Dans un premier temps, il s'agira de proposer une classification des systèmes hybrides. Pour ce faire, les définitions des systèmes hybrides ainsi que du stockage hybride seront proposées. De la classification de ces derniers, l'intérêt se portera sur la mise en évidence des intérêts et propriétés de chaque classe de systèmes de stockage hybride. L'usage de ces derniers sera décrit et les propriétés additionnelles conférées à un système hybride d'alimentation en énergie seront mises en évidence. Finalement, pour chaque classe de système hybride, les possibilités de connexions entre les accumulateurs seront examinées, et les meilleures solutions seront mises en évidence.

Enfin, des considérations sur le choix de la solution de stockage (hybride ou non) seront développées, et les suggestions de sélection et de dimensionnement d'accumulateurs seront formulées. Il sera alors possible de mettre en avant les avantages et inconvénients de la solution de stockage ainsi définie.

3.2 DÉFINITION DES SYSTÈMES HYBRIDES

Afin de définir les systèmes hybrides, une approche itérative sera présentée dans les lignes suivantes. Comme point de départ, il est possible de revenir aux définitions de quelques termes liés aux systèmes hybrides. Du dictionnaire Larousse de la Langue française sont issues les définitions suivantes :

- système (grec *sustêma*, composition) : *appareillage, dispositif formé de divers éléments et assurant une fonction déterminée* ;
- stockage : *réservoir ou ensemble de réservoirs ; appareil qui emmagasine de l'énergie pour la restituer à mesure des besoins* ;
- hybride (latin *hybrida*, de sang mêlé) : *qui est composé d'éléments de nature différente*.

La combinaison de ces termes et de leurs définitions respectives permet de formuler la définition des systèmes hybrides :

Un système hybride est un dispositif formé de plusieurs éléments de nature différente, qui assure une fonction déterminée.

Il va de soi qu'une formulation si large touche un vaste nombre d'éléments dont la plupart vont bien au-delà du cadre de ce travail. Il est possible de raffiner cette proposition se restreignant aux domaines liés à l'alimentation en énergie d'un système cible. Ainsi, il vient :

Un système d'alimentation hybride consiste en un assemblage de sources d'énergie dont les caractéristiques et/ou propriétés sont différentes, destiné à alimenter un système doté d'au moins un consommateur.

Par cette définition, sera considéré comme hybride tout dispositif étant alimenté par le biais de plusieurs sources d'énergie. Une extension de cette définition est applicable aux systèmes à consommateurs multiples étant, eux aussi, alimentés par plusieurs sources. Finalement, comme cas particulier de la formulation précédente, la définition d'un système de stockage hybride, qui fait l'objet de ce chapitre, est proposée :

Un système de stockage d'énergie hybride consiste en un assemblage d'accumulateurs d'énergie dont les caractéristiques et/ou propriétés sont différentes, destiné à alimenter un système doté d'au moins un consommateur.

Dans la suite de ce chapitre qui s'articule autour de la définition des systèmes hybrides d'alimentation en énergie, le terme *système hybride* sera, par abus de langage, utilisé pour désigner à la fois un système hybride d'alimentation et un système hybride de stockage d'énergie. En effet, ce chapitre abordera de manière indifférente les sources qui proposent une accumulation d'énergie à proprement parler des sources sans stockage, comme décrit au point 2.3.1.1.

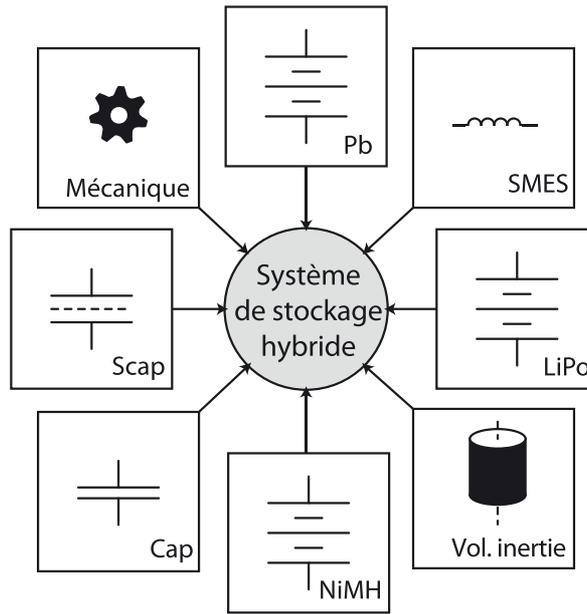


FIGURE 3.1 : Représentation d'un système de stockage hybride

3.2.1 Composition des sources

Plusieurs cas de figure peuvent être énumérés, quant à la composition d'un système hybride. Deux conditions sont mises en avant :

- les sources d'énergie peuvent être de nature physique différente. Exemple : moteur à combustion interne et batterie lithium-ion ;
- les sources d'énergie peuvent être utilisées pour une fonctionnalité différente. Exemple : accumulateur électrochimique sollicité en puissance et accumulateur électrochimique sollicité en énergie.

L'une de ces conditions doit être présente au sein d'un système afin que celui-ci puisse être qualifié d'hybride. En effet, par un raisonnement par l'absurde, si aucune de ces conditions ne venait à être remplie, le système devrait être composé de sources de nature identique utilisées pour une fonctionnalité similaire, ce qui contredit la définition de système hybride proposée plus haut.

Par contre, ces conditions sont non-exclusives, dans le sens où les deux peuvent être valables au sein d'un même système. L'exemple de l'usage simultané d'accumulateurs au plomb et de supercondensateurs peut illustrer cette possibilité, si la stratégie du système consiste en l'exploitation de chaque source d'énergie respectivement en énergie et en puissance. Ce point sera réexaminé plus tard lors du point 3.5.2.

3.3 DE L'ALIMENTATION DIRECTE AU SYSTÈME HYBRIDE

Au paragraphe 2.4, il a été question de mettre en évidence les conditions nécessaires à l'alimentation directe d'un système par le biais d'une unique source de type géné-

rateur. Au-delà des conditions alors formulées, des remarques liées aux contraintes imposées par un tel système ont été mises en évidence.

Dans le but de faire évoluer les développements et remarques du chapitre précédents aux systèmes de stockage hybride, les lignes suivantes mettent en lumière les possibilités offertes par un système multi-sources. Dans un premier temps, les diverses possibilités de connexion des sources seront recensées, suivies de la caractérisation des flux d'énergie au sein de ce type de systèmes.

3.3.1 Directions des flux d'énergie

La notion de flux d'énergie a été définie au § 2.4.2 dans le cadre de la connexion directe de deux sources d'énergie. Dans le cas des systèmes hybrides, la classification des cas d'applications en terme de flux d'énergie s'avère plus complexe. En effet, dès qu'un système est composé de plus de deux sources, les flux d'énergie entre chacune d'entre-elles doivent être caractérisés de manière individuelle. Un exemple est donné par [13] dans le cadre des véhicules hybride.

Ainsi, comme représenté dans la figure 3.2, une classification générique des configurations peut être mise en évidence en fonction du type de flux d'énergie entre les accumulateurs. Pour chaque paire de sources, le flux d'énergie qu'il est possible de faire circuler est évalué en fonction du type de chacune des composantes de la paire. En considérant toutes les combinaisons flux d'énergie possibles dans un système composé de 3 sources, il est possible de distinguer 4 cas :

SYSTÈME PARALLÈLE. Lorsqu'un système hybride est composé de sources dont les caractéristiques font que le sens du flux d'énergie est contraint dans toutes les branches, on le nommera parallèle. Ce type de système hybride, à dissocier de la notion d'hybride parallèle utilisée dans le domaine des véhicules, est uniquement composé de sources dont le flux d'énergie est unidirectionnel. Une esquisse est représentée à la figure 3.2 (a) où il n'existe qu'un flux d'énergie dans le sens charge-source, et aucun autre échange d'énergie entre les sources. Exemple : alimentation de secours via générateurs diesel.

SYSTÈME TAMPON. Un système hybride composé d'une unique source dont le flux d'énergie est bidirectionnel et d'autres sources dont le flux d'énergie est unidirectionnel sera qualifié de système tampon. Représenté à la figure 3.2 (b), ce type de système reprend les caractéristiques d'un système parallèle décrit ci-dessus. En plus, il y a la création de plusieurs chemins d'alimentation. En effet, la présence d'une source bidirectionnelle (en haut sur le graphique) offre un chemin d'alimentation parallèle, de la source à flux sortant (en bas) à la source à flux entrant (à droite). Exemple : système pile à combustible-supercondensateur.

SYSTÈME SEMI-BIDIRECTIONNEL. Un système hybride composé d'au moins deux sources dont le flux de puissance est réversible et une dont le flux de puissance est unidirectionnel sera qualifié de semi-directionnel. Représenté à la figure 3.2 (c), ce type de système reprend les caractéristiques des systèmes dits tampon. La principale caractéristique additionnelle est que les sources bidirectionnelles peuvent proposer un échange d'énergie entre-elles. Exemple : alimentation des auxiliaires d'un véhicule standard par un couple batterie-supercondensateur.

SYSTÈME BIDIRECTIONNEL. Un système hybride sera qualifié de bidirectionnel lorsqu'il est composé intégralement de sources dont le flux de puissance est réver-

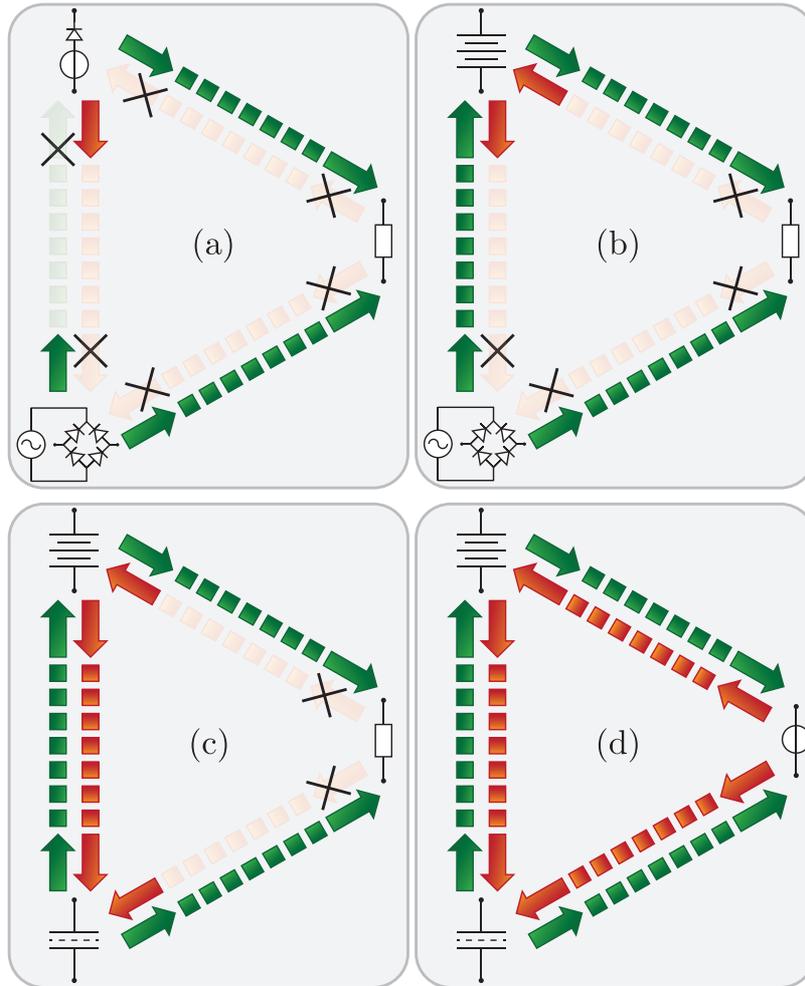


FIGURE 3.2 : Possibilités de connexion de sources en fonction de leurs propriétés au sein d'un système hybride comprenant 3 sources

sible. Représenté à la figure 3.2 (d), ce type de système reprend les caractéristiques des systèmes dits semi-bidirectionnels en permettant un échange bidirectionnel d'énergie entre toutes les sources. Exemple : métro électrique à alimentation réseau plus stockage embarqué [26].

A ces quatre cas qui caractérisent les possibilités d'échange d'énergie dans un système multi-source, il faudrait ajouter, pour être complet, les cas dans lesquels on trouve une incompatibilité de connexion d'au moins une source. Cependant, cela revient à considérer le système comme non-hybride (composé de moins de trois sources), donc hors du cadre de la réflexion menée dans ce chapitre.

Les définitions des structures de systèmes hybrides présentées ci-dessus ont été illustrées par des exemples simples comprenant trois sources. La validité de ces définitions est conservée pour des systèmes hybrides avec un plus grand nombre de sources. Le fait d'ajouter des sources au sein d'un système hybride apporte des configurations redondantes qui peuvent être aisément ramenées à l'une des 4 configurations proposées.

3.3.2 Connexion des sources

Alors que l'alimentation d'un système, réalisée de manière directe, implique des considérations spécifiques sur la forme d'interface (§ 2.3.1) entre les sources, mais aussi le type de ces dernières sources (§ 2.4), le cas de l'association de plusieurs sources doit être abordé de manière moins restrictive. Physiquement, il existe plusieurs manières de connecter des sources d'énergie entre-elles. Deux catégories sont proposées, différenciées par la forme d'interface (introduite au chapitre 2.3.1).

FORME D'INTERFACE NON COMMUNE. Au sein d'un accumulateur hybride, il est possible d'associer deux sources dont la forme d'interface n'est pas commune. Cette association sous-entend la présence d'un élément de conversion qui permet l'échange d'énergie entre deux formes d'interface. Il est alors possible de distinguer deux types d'éléments de conversion : les passifs qui ne permettent pas d'influencer le transfert d'énergie, et les éléments actifs qui offrent un moyen de contrôler le flux d'énergie.

FORME D'INTERFACE COMMUNE. Dans le cas où la forme d'interface des sources d'un système de stockage hybride est commune à ces dernières, les possibilités de connexion se divisent en deux catégories : la connexion directe et la connexion via un élément de conversion.

Dans le premier cas, il s'agit de la connexion directe entre au moins deux accumulateurs. Dans une telle configuration parfois nommée association *passive*, la connexion d'accumulateurs n'est permise que si les propriétés de chaque élément sont respectées [27]. Par exemple, au sein de la famille des accumulateurs présentant une interface électrique, il est question de compatibilité des tensions et courants.

La seconde manière d'interfacer des accumulateurs proposant une forme d'interface similaire est de faire usage d'éléments de conversion, qui permettent le contrôle de la contribution de chaque accumulateur à la sollicitation totale du système de stockage hybride.

3.3.3 Contraintes topologiques des flux d'énergie

En premier lieu, il a été question de distinguer les multiples combinaisons de sources qui ont permis de classer les différentes interactions entre les sources selon leur nature, dans l'hypothèse où la forme d'interface des différents éléments est similaire. Lors de cette étape, les contraintes topologiques de la connexion entre les différentes sources dues notamment aux différentes formes d'interface sont prises en compte.

Dans le cadre de l'association de multiples sources d'énergie, et notamment lorsque la forme d'interface des sources n'est pas identique, la question du chemin emprunté par le flux d'énergie est primordiale. En effet, à l'image de n'importe quel système composé d'éléments connectés, il existe différentes manières d'interconnecter différentes sources ; leur disposition peut-être choisie, par exemple, en fonction de leur forme d'interface, de la présence d'éléments de conversion, des propriétés que l'on souhaite conférer au système hybride, etc. La figure 3.3 recense plusieurs façons de connecter des sources au système à alimenter, lorsque la forme d'interface n'est pas commune ou lorsqu'il y a la présence d'éléments de conversion. Sur cette représentation, les échanges d'énergie possibles sont représentés par des traits, les sources d'énergie as-

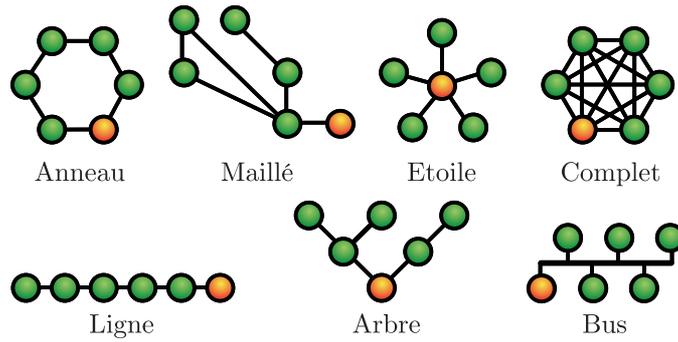


FIGURE 3.3 : Différentes possibilités d'interconnexion d'éléments

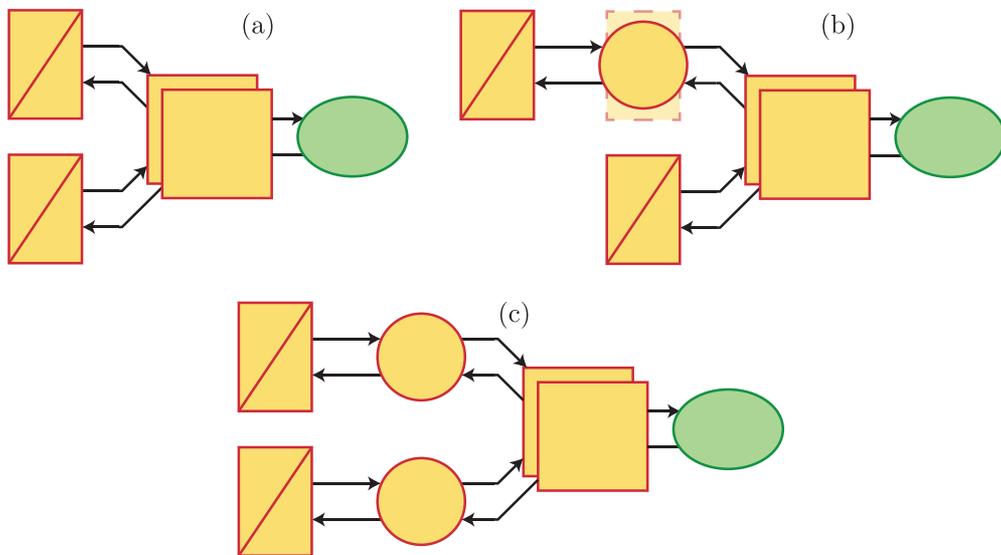


FIGURE 3.4 : Différentes possibilités d'interconnexion de 3 sources

sociées à leurs éléments de conversion respectifs par des points verts, et le système à alimenter par un point rouge.

De ces considérations générales formulées pour un nombre élevé de sources, il est possible de se restreindre à un nombre plus faible de sources afin de mettre en évidence les contraintes liées à la topologie du système sur les flux d'énergie. Ainsi, se fondant sur un système composé de trois sources, un nombre restreint de combinaisons est possible. La figure 3.4 présente quelques combinaisons de sources qui forment un système hybride.

3.3.3.1 Connexion passive

Ce type d'alimentation consiste en une connexion des accumulateurs directe au système à alimenter. Il est évident que deux conditions nécessaires doivent être réunies afin d'autoriser une telle connexion représentée en figure 3.4 (a) :

- la forme d'interface doit être commune à toutes les sources ;

– la compatibilité de chaque paire de source à la connexion directe doit être assurée. Dans le cadre des connexions directes passives, il est clair que la contribution de chaque source à l'alimentation du système dépend uniquement des propriétés intrinsèques aux sources ainsi que de la sollicitation en puissance imposée par le système à alimenter. Dans ce sens, il est impossible de contrôler de manière active chaque contribution, malgré qu'il soit possible, sous certaines conditions, de prévoir la répartition de la sollicitation entre les accumulateurs. Le paragraphe 3.5.1.2 se penchera plus en détail sur ce type d'association en mettant en lumière l'intérêt que peut avoir un tel système hybride.

3.3.3.2 Connexion active

Lorsque les formes d'interface ne sont pas toutes similaires, la connexion des sources implique l'usage d'éléments de conversion, comme l'a introduit le paragraphe 3.3.2. De même, lorsque la contrôlabilité du flux d'énergie est souhaitée, l'insertion d'au moins un élément de conversion est nécessaire. La figure 3.4 (b) et (c) montre l'usage d'un ou plusieurs éléments de conversion mono-physiques ou multi-physiques.

Dans ce cas de figure, la contribution de chaque accumulateur peut être activement contrôlée par le biais des éléments de conversion.

3.4 CLASSIFICATION DES SYSTÈMES HYBRIDES

La définition des systèmes de stockage hybride étant formulée, et les critères sur les flux d'énergie et contraintes topologiques étant abordés, il est temps de se focaliser sur une classification des systèmes hybrides. Les pages précédentes ont permis de mettre en évidence le nombre quasi-illimité de combinaisons qui peuvent être rencontrées au sein de systèmes hybrides.

La classification et l'analyse de tels systèmes s'avèrent donc délicates, si le souhait est de ne pas se focaliser sur un type particulier de systèmes hybrides. Peu de catégorisations existent au sein de la littérature. La plus commune d'entre-elles est certainement la classification des véhicules hybrides dont un grand nombre de publications se fait l'écho [28, 29, 30]. Au sein de ces dernières, sont recensées 3 grandes catégories de véhicules hybrides : les systèmes hybrides série, les systèmes hybrides parallèle et les systèmes hybrides série-parallèle (ou mixtes).

Au-delà du fait d'être restreinte aux véhicules seulement, cette classification se fonde principalement sur la répartition des contraintes énergétiques au sein du système, et notamment de la répartition de ce dernier au sein des deux sous-systèmes liés aux deux sources d'énergie et surtout leur forme d'interface respective. Le critère de différenciation est principalement défini par le nombre et le type de conversions et de forme d'interface pour le flux d'énergie issu de chaque source.

D'un point de vue plus général, cette classification des systèmes hybrides pourrait être étendue sans difficultés aux systèmes dont les sources d'énergie ont une forme d'interface différente, mais pas au-delà. Ainsi, dans le but de classer de manière plus large les systèmes hybrides, il est proposé d'effectuer un classement par fonctionnalité. En effet, la motivation de l'utilisation d'un système hybride permet, dans la plupart des

cas, de mettre en évidence certaines propriétés, mais aussi des considérations sur les accumulateurs, leur connexion ainsi que leur dimensionnement. Alors que ceci sera entrepris au § 3.5, les prochaines lignes se focalisent sur la description des fonctionnalités proposées par les systèmes hybrides, par rapport à un système équivalent non-hybride.

3.4.1 *Energétique*

La fonctionnalité énergétique se focalise sur le rendement énergétique du système. Ainsi, ce type de système hybride a comme objectif la réduction de la consommation d'un système donné. L'augmentation du rendement énergétique du système peut être obtenue en agissant sur plusieurs facteurs, le premier étant le flux d'énergie qui alimente ce dernier.

En effet, le fait d'ajouter une source d'énergie à un système peut, dans certains cas, modifier les propriétés du flux d'énergie entre la source d'énergie et le système à alimenter. Dans la majorité des applications qui répondent à cette description, un flux d'énergie non-réversible devient réversible lorsque le système est hybridé. Les exemples de l'hybridation énergétique par le biais du flux d'énergie sont largement répandus : les véhicules hybrides en sont l'illustration parfaite ; la récupération, même partielle, de l'énergie de freinage autorisée par ce type de systèmes permet une réduction significative de la consommation du système, comme cela a été mis en évidence dans l'introduction de ce travail (figure 1.9 page 12). Un second exemple est l'hybridation d'un train diesel-électrique par l'ajout de supercondensateurs [31].

La seconde façon de diminuer la consommation d'un système via son hybridation est d'agir sur le rendement de son alimentation en énergie. En effet, comme il a été mis en évidence au point 2.6, certains types de charges, via les contraintes que ces dernières imposent à l'alimentation, impliquent un rendement d'extraction de l'énergie peu élevé. Dans ce cas, le fait d'ajouter une source d'énergie au système peut améliorer significativement le rendement de l'alimentation d'un système.

3.4.2 *Spectrale*

La seconde fonctionnalité qui peut être procurée par un système hybride est une meilleure adéquation entre la sollicitation en puissance demandée par le système et celle qui peut être fournie par son alimentation en énergie. En effet, cet intérêt est marqué pour les charges dont la consommation est fortement intermittente ou lorsque les sauts de puissance y sont de grande amplitude. A titre d'exemple, l'alimentation de l'un des accélérateurs de particules du CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire) fait usage d'une alimentation hybride afin de pallier aux sauts de puissance importants [32].

Cette fonctionnalité peut être aussi appliquée aux systèmes dont l'alimentation est assurée par une source dont la réponse à un saut de puissance est non-immédiate (§ 2.3.4). Afin de répondre à un changement brusque de la demande en puissance que certaines sources d'énergie ne sont pas capables de fournir, l'ajout d'autres voies d'alimentation permet de pallier au délai qui est généralement nécessaire. L'alimentation de systèmes par le biais d'une pile à combustible est souvent réalisée de manière hybride

avec une source d'énergie auxiliaire qui permet à l'intervalle de quelques secondes nécessaire à la pile pour changer son état de fonctionnement [33].

3.4.3 Redondance

Par essence, l'ajout de sources d'énergie peut, en fonction du dimensionnement de ces dernières, contribuer à une augmentation de la redondance de la chaîne d'alimentation en énergie d'un système. Cependant, cette fonctionnalité peut être explicitement recherchée, et ainsi être proposée via l'hybridation d'un système. En effet, l'ajout de sources d'énergie au sein d'un système peut permettre dans certains cas de pallier à la défaillance de l'une d'entre-elles. Les systèmes d'alimentation sans interruption (UPS) permettent de réaliser l'hybridation de systèmes traditionnellement connectés uniquement au réseau domestique. [34]

3.4.4 Versatilité

Lorsque la fonctionnalité apportée par un système de stockage hybride ne peut être apparentée aux trois catégories décrites ci-dessus (énergétique, spectrale ou redondance), l'intérêt d'un système hybride peut être vu dans la versatilité que ce dernier peut conférer à l'application. En effet, la présence de plusieurs sources d'énergie peut permettre au système à alimenter de proposer un comportement modifié, une fonction supplémentaire, ou un agrément supplémentaire à l'utilisateur. Un exemple commun est l'usage de systèmes hybrides pour l'assistance au démarrage à froid des véhicules à moteur à combustion interne [35].

3.4.5 Multiple

Bien entendu, les quatre catégories présentées ci-dessus ne permettent pas un classement univoque des systèmes de stockage hybride. Au sein de nombreux systèmes, il existe une volonté de panacher les différentes fonctionnalités proposées par une alimentation hybride. L'usage des véhicules hybrides de type *plug-in* pour le support du réseau électrique en est un exemple [36].

3.5 CHOIX DES ACCUMULATEURS ET NOTIONS DE DIMENSIONNEMENT

Au-delà de la classification des systèmes de stockage hybride par leurs propriétés, il est aussi question, dans les lignes qui suivent, d'identifier les caractéristiques qui doivent être proposées par le système hybride pour chacune des fonctionnalités. En effet, chaque fonctionnalité implique des considérations particulières sur le système hybride qui la propose.

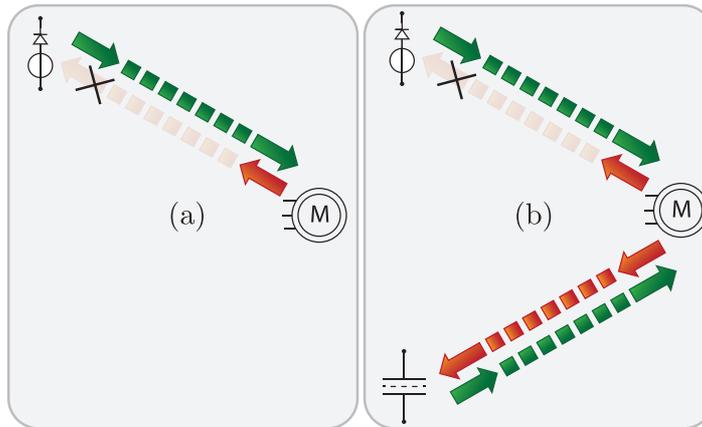


FIGURE 3.5 : Fonctionnalité énergétique atteinte par la réversibilité du flux d'énergie

3.5.1 Énergétique

Le § 3.4.1 a introduit la fonctionnalité de type *énergétique* qu'un système hybride peut proposer. Cette dernière, dont l'intérêt est l'augmentation de la performance énergétique du système, a été divisée en deux catégories distinctes en fonction de la modification qui est apportée par rapport à un système non-hybride.

3.5.1.1 Réversibilité du flux d'énergie

La fonctionnalité énergétique peut être premièrement obtenue sur des systèmes qui réunissent les conditions suivantes :

- Existence d'un flux d'énergie non-réversible entre la source et la charge ;
- Le système à alimenter est de type réversible ;
- Le système à alimenter présente une possibilité de récupération de l'énergie qui n'est pas exploitée dans l'approche classique non-hybride.

En figure 3.5 est représenté un exemple de système dont la propriété énergétique veut être mise en avant par hybridation. Le système original (non-hybride) représenté en (a) présente les caractéristiques mises en évidence dans l'énumération précédente. La version hybride selon le critère énergétique (b) met en avant la réversibilité du flux d'énergie entre la nouvelle source d'énergie et le système à alimenter.

Cette façon de procéder requiert une modélisation correcte du système à alimenter, de manière à proposer une estimation de la quantité maximale qu'il doit être possible de stocker. A titre d'exemple, la modélisation d'un véhicule léger met en avant deux sources desquelles il est possible de récupérer de l'énergie : l'inertie du véhicule ainsi que l'énergie potentielle gravitaire. Dans ce sens, les critères principaux du dimensionnement sont définis par la quantité d'énergie à stocker, ainsi que la puissance du transfert d'énergie entre le système alimenté et la source additionnelle.

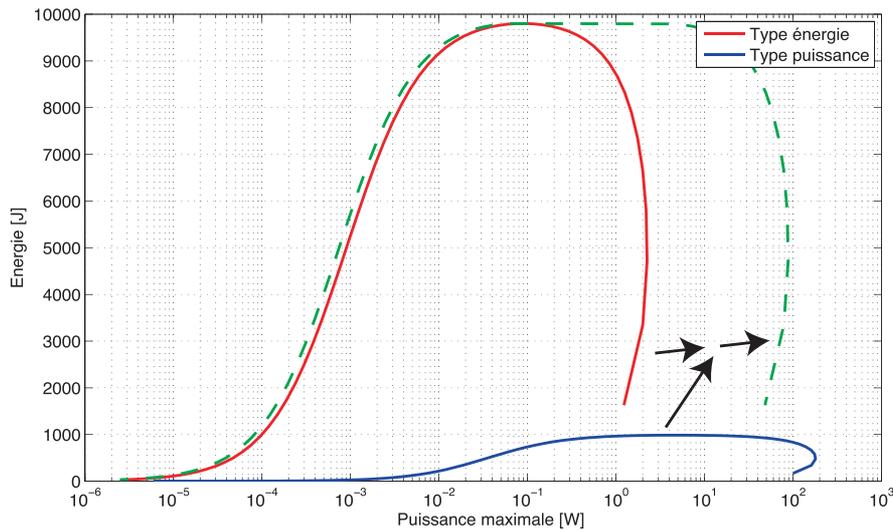


FIGURE 3.6 : Caractéristique recherchée pour l'accumulateur hybride

3.5.1.2 Répartition des sollicitations entre les sources

La fonctionnalité énergétique peut être atteinte par une répartition des sollicitations en puissance de la charge sur les différentes sources d'énergie. Plus haut, le § 2.6.4 a mis en lumière la problématique de l'alimentation d'une charge intermittente par une unique source d'énergie. Il a été démontré, par le biais de modèles simples de charge et source, que le rendement d'extraction de ce genre de systèmes est généralement peu optimal, en plus du sur-dimensionnement énergétique qui est requis.

Pour un tel cas, l'ajout de sources d'énergie présente un intérêt tant en terme de rendement énergétique que de dimensionnement de l'alimentation du système. Dans ce sens, l'usage de types d'accumulateurs distincts permet d'obtenir un comportement global de meilleure facture par leur association. Ainsi, comme présenté en figure 3.6, l'usage d'accumulateurs seuls permet d'obtenir l'une ou l'autre des deux caractéristique-type pour un système de stockage de l'énergie.

L'hypothèse est posée qu'une association correcte de plusieurs sources d'énergie de type puissance et type énergie (définies au § 2.6.2.1) permette à l'accumulateur hybride de proposer une caractéristique de fonctionnement plus intéressante, représentée en vert sur la figure 3.6. En termes d'association de deux sources, deux classes de solutions sont clairement distinguées :

- L'association directe, passive, de sources sans élément de conversion. Cette dernière sous-entend que les sources d'énergie proposent une forme d'interface commune. L'objectif est une connexion série ou parallèle des sources afin que les contraintes en puissances puissent être réparties entre ces dernières. Plusieurs tentatives ont mis en évidence la mauvaise association du couple supercondensateur et accumulateur lithium-ion [37, 38]. Cependant, il peut être aisément démontré par le biais des modèles proposés au chapitre précédent qu'une telle association ne permet que partiellement de satisfaire aux objectifs fixés par cette association hybride.

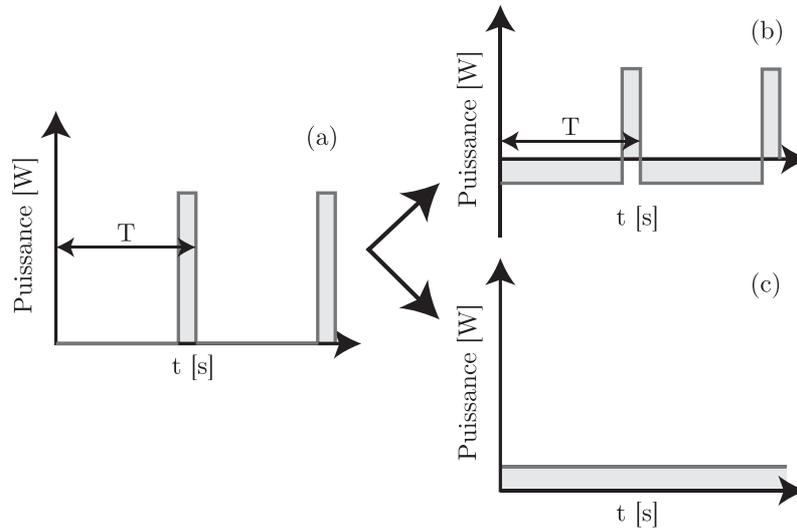


FIGURE 3.7 : Répartition de la sollicitation en puissance entre les sources

- L'association active de sources, par le biais d'un ou plusieurs éléments de conversion. Cette association permet, par le biais d'éléments de conversion, de contrôler activement la sollicitation des sources d'énergie, mais aussi d'interfacer des sources qui ne proposent pas de forme d'interface commune. Dans ce sens, il devient possible de solliciter chacun des éléments au point de fonctionnement optimal en termes de rendement énergétique. En se référant à la figure 3.7, grâce à une telle association, une sollicitation fortement intermittente (a) est décomposée en une sollicitation continue (c) et une sollicitation réversible à paliers de puissance (b). En d'autres termes, la source de type *énergie* fournit au système la valeur moyenne de la puissance consommée, alors que la source du type puissance fait office d'adaptation de puissance, de sorte qu'à chaque instant, la somme des contributions de chaque source égale la puissance consommée par le système à alimenter.

Par le biais des modèles de charges et sources développés dans le chapitre 2, il est possible de mettre en évidence les caractéristiques obtenues par un système hybride dont l'objectif est de répartir les sollicitations entre les sources. Ainsi, la figure 3.8 affiche la différence entre les caractéristiques obtenues par association passive ou active lorsque le système est sollicité par une charge intermittente ($D = 0.1$). Dans ce cadre, les critères de dimensionnement des accumulateurs en termes de contenu énergétique et de puissance disponible découlent de l'analyse de la sollicitation en puissance du système à alimenter.

3.5.2 Spectrale

Les systèmes hybrides dont la fonctionnalité de type spectral est mise en avant ont la particularité de comporter au moins une source dont la réponse à une sollicitation en puissance est non-immédiate (notion introduite au § 2.3.4). L'alimentation d'un système donné par une seule source présentant un délai dans la disponibilité de puissance implique un compromis :

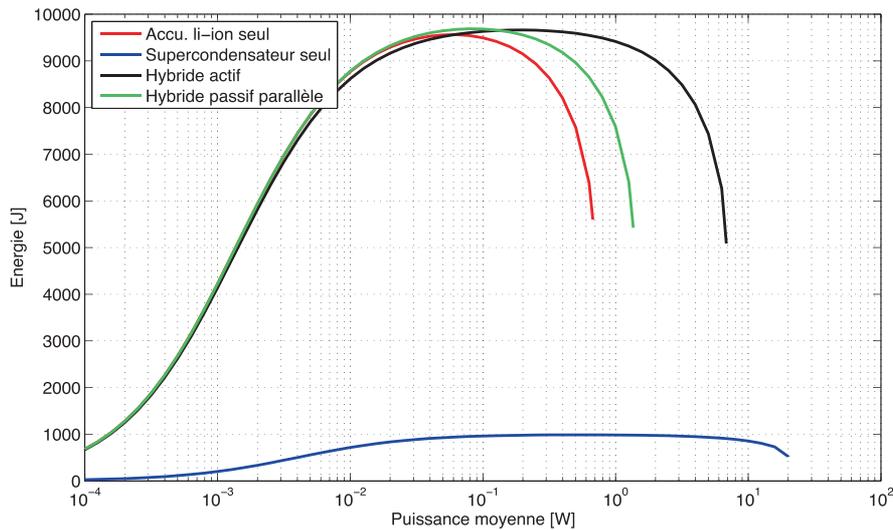


FIGURE 3.8 : Caractéristiques affichées par les associations passives et actives d'accumulateurs alimentant une charge intermittente ($D = 0.1$)

- soit il est possible de lisser et de retarder suffisamment la demande en puissance du système à alimenter de sorte que l'unique source soit capable d'y répondre ;
- soit il n'est pas possible de satisfaire à ce compromis et la nécessité de faire usage d'un système hybride existe.

Dans l'hypothèse où une modification de la sollicitation requise par la charge n'est pas envisageable, l'introduction d'autres sources d'énergie est nécessaire afin de garantir l'alimentation du système dans l'intervalle où la source à réponse non-immédiate n'est pas capable de fournir suffisamment de l'énergie. Dans ce cas, le dimensionnement de la source d'énergie, de type *puissance*, sera dicté par le délai de réponse de la source non-immédiate.

3.5.3 Redondance

La propriété de redondance est inhérente aux systèmes hybrides. En effet, le simple fait de proposer plusieurs voies d'alimentation pour un système donné participe à une augmentation de degré de redondance du système. Les deux conditions qui sont formulées pour qu'un système hybride puisse être qualifié de redondant sont les suivantes :

- Le système doit pouvoir être alimenté par au moins deux sources d'énergie dont les flux parviennent au système de manière parallèle ;
- Si le fonctionnement de n'importe quelle source d'énergie devait être interrompu, les sources restantes doivent être en mesure de répondre aux sollicitations du système à alimenter.

Ainsi, il est possible de définir le degré de redondance n comme le nombre minimum de sources d'énergie qui peuvent faillir sans que l'alimentation du système soit interrompue.

3.5.4 *Versatilité*

Le critère de versatilité qui peut être proposé par certains systèmes hybrides permet ni de proposer des considérations générales, ni d'esquisser des règles de dimensionnement. En effet, la versatilité qui est conférée à la charge par son alimentation hybride dépend clairement du cadre d'application. Cependant, à titre d'exemple, le chapitre 4 détaillera et se focalisera sur l'étude d'un système hybride dont la fonctionnalité est la versatilité.

3.6 SYNTHÈSE

Ce chapitre s'est focalisé sur la description et la classification des systèmes hybrides. Après une tentative de définition de termes appropriés, mais aussi des systèmes hybrides d'alimentation et de stockage de l'énergie eux-mêmes, la description des nombreux degrés de liberté proposés par les systèmes multi-sources ont été mis en exergue. En effet, de par un nombre plus important de sources d'énergie au sein du circuit d'alimentation hybride d'un système, de nombreuses possibilités de disposition de ces éléments au sein du système apparaissent, en comparaison des systèmes d'alimentation directe abordés au chapitre 2.

Ces multiples combinaisons ont été distinguées de plusieurs façons. Premièrement les flux d'énergie entre les sources composant un système hybride ont été classifiés. Chacun des cas permet la mise en évidence de propriétés particulières, comme l'échange d'énergie (réversible ou non) entre les sources. Deuxièmement, au point 3.3.2, l'accent a été mis sur la distinction des formes d'interface au sein d'un même système hybride. Un système composé de sources présentant de multiples formes d'interface devra être nécessairement composé d'éléments assurant la conversion d'énergie et le transfert de cette dernière entre les différentes formes d'interface. Dans le même sens, cette étude a permis de distinguer les connexions actives et passives entre les sources d'énergie. Alors que les premières permettent un contrôle actif du flux d'énergie, les secondes ne permettent pas d'agir sur le transfert, et ce dernier dépend alors des différents états du système.

Par la suite, une classification générale des systèmes hybrides a été proposée. Contrairement à la classification existante dans le domaine des véhicules hybrides, la proposition vise à classier les systèmes en fonction de la fonctionnalité que le système hybride confère à l'ensemble. Les quatre catégories qui ont été proposées sont : énergétique, spectrale, redondance et versatilité. Ces dernières ont été décrites et des exemples de systèmes ont été abordés, avec la mise en évidence de l'intérêt ou de la nécessité du système hybride par rapport à une solution classique.

Finalement, pour chaque catégorie de système hybride, les conditions nécessaires à leur mise en oeuvre ont été détaillées, en parallèle avec leur implémentation physique. Dans chaque cas, des critères de choix des accumulateurs ont été suggérées.

De cette classification générale des systèmes hybrides, il ressort des indications simples, mais fondamentales, car liées directement au but recherché. Cependant, le dimensionnement réel d'un système hybride d'alimentation en énergie dépend de nombreux paramètres relatifs à l'application, mais aussi aux propriétés particulières

des accumulateurs candidats. Dans ce sens, il reste extrêmement difficile de formuler des relations mathématiques afin de guider le dimensionnement pour l'obtention d'une fonctionnalité particulière d'un système hybride. De plus, le développement a souligné le fait que plusieurs fonctionnalités peuvent être recherchées pour un cas d'application donné. Dans ce cas, les considérations formulées tout au long de ce chapitre restent valides ; les conditions nécessaires à chacune des fonctionnalités se cumulent, tout comme les contraintes au dimensionnement des sources d'énergie.

CAS D'APPLICATION : ACCUMULATEUR LI-ION/SUPERCONDENSATEUR

4.1 OBJECTIFS

SCIA lors que le chapitre précédent s'est focalisé sur la description des systèmes hybrides ainsi que sur l'association des sources d'énergie, les paragraphes suivants aborderont un cas d'application d'un système hybride. Tout d'abord, il sera question de présenter le système à étudier ainsi que son contexte, qui vise le remplacement d'un accumulateur par un système de stockage hybride afin de proposer des caractéristiques particulières.

Ensuite, se basant sur les contraintes qui seront énoncées en introduction et sur les développements du chapitre 3, les avantages et inconvénients d'un système de stockage hybride seront confrontés à ceux d'un système d'alimentation classique, à un seul type d'accumulateur d'énergie. Le type de l'accumulateur hybride sera détaillé en fonction de la fonctionnalité qui doit être mise en évidence.

La présentation de ce dispositif particulier mettra en évidence l'importance du rendement lors de la phase de recharge de l'accumulateur hybride. En effet, il sera démontré que le dimensionnement des accumulateurs dépend essentiellement du rendement, ce dernier étant intrinsèquement lié à la durée de charge. Ces deux paramètres seront donc examinés avec la plus grande attention durant ce chapitre.

Finalement, le dimensionnement à proprement parler de ce cas d'application sera effectué; ce dernier sera suivi par une validation expérimentale, exécutée sur un prototype à pleine échelle.

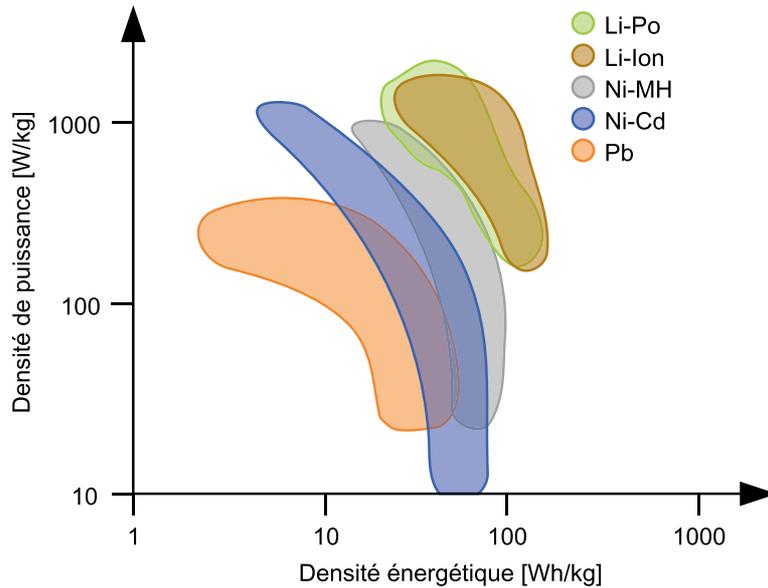


FIGURE 4.1 : Densité énergétique et de puissance proposée par certains fabricants d'accumulateurs électrochimiques

4.2 CAHIER DES CHARGES

La problématique de l'alimentation en énergie des systèmes électroniques autonomes (souris d'ordinateur, téléphone portable, etc.) est couramment résolue par l'usage d'accumulateurs électrochimiques de type lithium-ion. En effet, l'intérêt de ce type de cellules de stockage est de proposer, par rapport aux autres technologies électrochimiques, une densité énergétique élevée, comme le montre la figure 4.1.

Au-delà de proposer une capacité de stockage intéressante pour de nombreuses applications mobiles, ce type d'accumulateur présente une durée de vie similaire, en termes de cycles de charge, à celle de l'objet qui doit être alimenté [12]. On constate cependant que, à l'image de beaucoup d'accumulateurs électrochimiques, la durée de recharge de ce dernier reste non-négligeable, voire plus longue que la durée de l'utilisation de l'objet (décharge de l'accumulateur). La conséquence principale de cette propriété de l'accumulateur en question est d'invalider le fonctionnement du dispositif (ou du moins sa capacité à être mobile) durant la recharge de sa batterie.

Pour pallier à ce problème, on propose d'étudier la possibilité de remplacer l'accumulateur d'énergie par un autre accumulateur qui alimente le système autonome en énergie avec les caractéristiques suivantes :

- le système doit proposer une autonomie similaire au système original, initialement alimenté par un accumulateur lithium-ion ;
- lorsque l'accumulateur hybride est vide, une recharge rapide d'une durée inférieure à la dizaine de secondes doit pouvoir fournir une autonomie suffisante afin que l'objet puisse être utilisé pendant une durée correspondant à environ 5% de sa durée d'usage nominale ;

Paramètre	Valeur
Consommation de l'application	200mW
Energie stockée	> 10.6kJ
Energie stockée en charge rapide	> 500J

TABLE 4.1 : Cahier des charges du système hybride

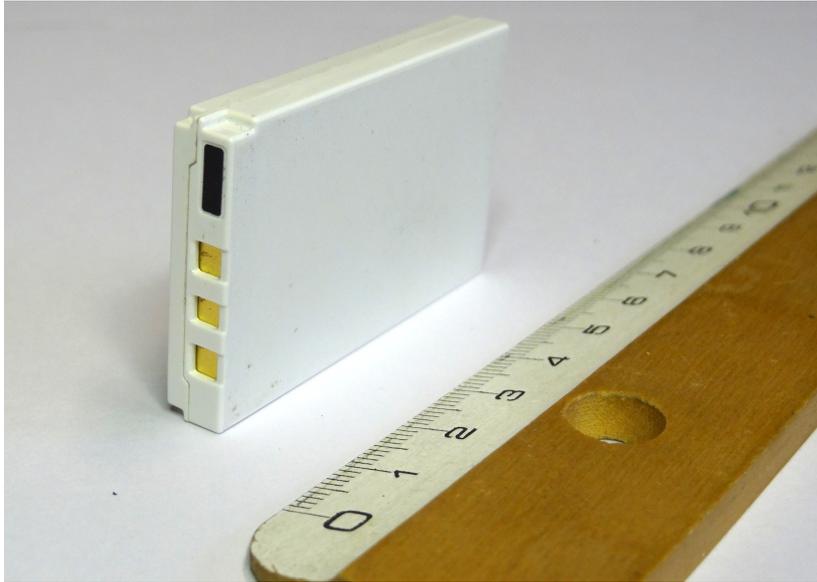


FIGURE 4.2 : Accumulateur électrochimique à remplacer (53x33x7mm)

- la taille et le poids de l'accumulateur hybride doivent rester raisonnables par rapport au système original, 200% au maximum.

Conformément à ceci, on résume le cahier des charges dans le tableau 4.1. Dès lors, l'option qui consiste à remplacer le système actuel de stockage de l'énergie par un autre système de stockage non-hybride peut être exclue. En effet, la seconde condition posée ci-dessus permet d'emblée d'écarter les systèmes de stockage d'énergie de type électrochimique, car la puissance lors de leur recharge est fortement limitée, notamment pour les cellules de faible capacité dont il est question dans cet exemple. De même, le remplacement de l'accumulateur lithium-ion (figure 4.2) par un accumulateur (non-hybride) d'autre type qu'électrique est exclu pour des raisons de volume et de poids. La seule voie envisageable dans le choix d'un accumulateur est donc la voie hybride.

4.3 ACCUMULATEUR HYBRIDE

Suivant les développements du chapitre 3, les composants de l'accumulateur hybride seront définis, dans un premier temps, en fonction des caractéristiques visées, présentées au paragraphe précédent. En fonction des règles d'association des accumulateurs développées plus tôt, les différentes combinaisons des deux composants de l'accumulateur hybride seront énumérées et l'intérêt de ces dernières sera mis en évidence.

4.3.1 Identification de la fonctionnalité recherchée

Le prérequis à la définition et au dimensionnement d'un système hybride est de pouvoir déterminer les fonctionnalités recherchées par le système hybride, telles que décrites au point 3.4. Dans ce sens, et en accord avec les caractéristiques recherchées décrites au paragraphe 4.2, l'intérêt de chaque fonctionnalité est étudié :

ENERGÉTIQUE. Cette fonctionnalité sous-entend qu'il soit possible de récupérer de l'énergie par une réversibilité du flux, ce qui n'est pas le cas ici, étant donné que la charge est unidirectionnelle. Elle peut être aussi intéressante s'il est possible de montrer le comportement fortement intermittent du système à alimenter et l'impact de ce dernier sur la quantité d'énergie extractible. L'étude du fonctionnement du système à alimenter montre que le comportement de ce dernier n'est pas intermittent. Cette fonctionnalité peut donc être exclue.

SPECTRALE. De manière analogue à ce qui est décrit ci-dessus, le système ne comporte pas de source dont la réponse à une sollicitation en puissance ne soit pas immédiate.

REDONDANCE. La propriété de redondance n'est pas abordée dans les caractéristiques décrites au § 4.2.

VERSATILITÉ. Suite aux considérations précédentes, il paraît clair que la fonctionnalité qui est apportée par le système hybride est un gain en versatilité, dans le sens où l'intérêt de l'hybridation s'exprime par un meilleur confort d'utilisation du système via la courte durée de recharge.

Ainsi le critère principal qui justifie l'hybridation est la versatilité. Cependant, il est intéressant de noter que les objectifs de ce système sont, en définitive, assez proches de la fonctionnalité spectrale. En effet, même si le système ne comporte pas de source à réponse non-immédiate, il existe une incompatibilité entre les caractéristiques de l'accumulateur électrochimique original et la volonté de proposer une recharge rapide à puissance élevée. Dans ce sens, et étant donné que la fonctionnalité versatilité n'implique pas de considérations directes sur le dimensionnement des sources d'énergie, une approche d'hybridation compatible avec le critère spectral va être proposée.

4.3.2 Choix des accumulateurs

La volonté de garder sous contrôle le volume et le poids de l'accumulateur hybride restreint le choix des éléments qui le composent. Ainsi, tous les accumulateurs d'énergie dont cette dernière ne peut être extraite sous forme électrique sont exclus. De cette manière, on évite de devoir introduire, au sein de l'accumulateur hybride, un composant devant assurer une conversion de forme d'énergie (par exemple mécanique-électrique).

De cette restriction, une liste d'accumulateurs candidats peut être extraite : accumulateurs électrochimiques (lithium-ion, nickel métal, etc.), accumulateurs électriques (condensateur, supercondensateur) et magnétiques (inductance).

Selon les contraintes présentées plus haut, une conclusion sur le comportement macroscopique de l'accumulateur hybride peut être formulée. Ce dernier doit proposer à la fois :

- une densité en énergie élevée, de l'ordre de grandeur de celle de l'accumulateur électrochimique lithium-ion ;
- une densité en puissance élevée, afin d'autoriser une recharge rapide.

Une fois réunies, les composantes de l'accumulateur hybride devront présenter, elles aussi, ces caractéristiques. Ainsi, et selon la classification du comportement des accumulateurs (§ 2.6.2.1) et l'incompatibilité de la densité de puissance et d'énergie, il est évident que le choix des composantes de l'accumulateur hybride inclura un accumulateur de type énergie et un accumulateur de type puissance.

4.3.2.1 *Type énergie*

Au sein de la liste des accumulateurs candidats présentée ci-dessus, seuls les accumulateurs électrochimiques permettent de garantir une quantité suffisante d'énergie stockée, par rapport aux objectifs demandés. Dans le même sens, et étant donné la densité énergétique des accumulateurs lithium-ion, ce type d'accumulateur reste privilégié pour deux raisons. Premièrement, plus la densité énergétique de ce composant est élevée, plus, pour une quantité d'énergie donnée, la taille de l'élément de stockage sera faible. Ce qui laisse, toujours *a priori*, de l'espace disponible pour le second composant de l'accumulateur hybride, dont on sait que sa densité en énergie est faible. Deuxièmement, la tension de fonctionnement proposée par ce type d'accumulateur est compatible, sans conversion, avec celle du système qui doit être alimenté.

4.3.2.2 *Type puissance*

Dans la liste des accumulateurs candidats, le seul accumulateur type puissance dont les caractéristiques permettent l'accumulation d'une quantité d'énergie suffisante pour répondre aux contraintes du problème est le supercondensateur.

4.3.3 *Combinaison des accumulateurs*

Le type des éléments de stockage d'énergie composant l'accumulateur hybride étant déterminé, il s'agit désormais de les associer afin de former un accumulateur hybride dont les caractéristiques répondent au cahier des charges. En guise d'application des paragraphes 3.5.2 et 3.3.1, la proposition d'une alimentation dont les flux d'énergie sont organisés de manière parallèle est retenue. La figure 4.3 met en évidence la caractéristique de chaque accumulateur retenu selon la représentation de Ragone modifiée et la compare aux puissances en jeu (charge rapide et consommation de l'application).

En plus du fonctionnement indépendant de chaque accumulateur, cette combinaison permet une contribution simultanée de chaque accumulateur à l'alimentation en énergie du système. Il apparaît donc la possibilité d'obtenir la fonctionnalité additionnelle de pouvoir répartir, de manière commandée, la charge entre les deux accumulateurs d'énergie.

Ceci peut avoir un intérêt dans le cas où l'application à alimenter présente une demande en puissance fortement intermittente. Cependant, à l'image de ce qui a été mentionné plus haut, cette éventualité peut être exclue dans le cadre de ce cas d'appli-

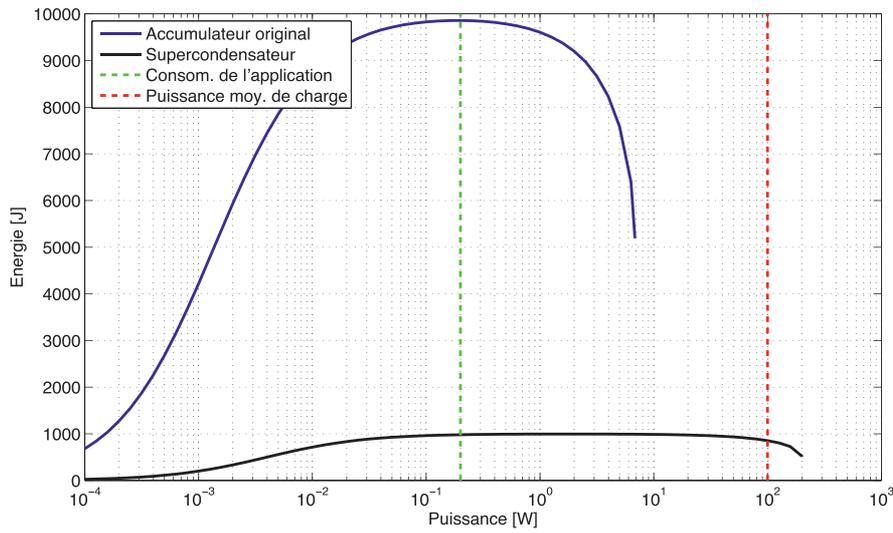


FIGURE 4.3 : Caractéristiques des accumulateurs et puissances en jeu

cation, étant donné que l'alimentation du système était, au préalable, assurée par un accumulateur électrochimique lithium-ion uniquement dont le rendement d'extraction était proche de l'unité.

4.3.4 Alimentation de l'application et commande

Selon le paragraphe précédent, l'interface entre les accumulateurs hybrides et l'application doit être définie. La figure 4.4 présente la topologie de l'alimentation de l'application par le biais des deux accumulateurs d'énergie, avec le convertisseur DC/DC associé.

Ce diagramme se borne à représenter l'alimentation en énergie de l'application en ignorant les voies de recharges ; celles-ci seront abordées plus tard dans ce chapitre. La structure maximale de commande (SMC) du régulateur DC/DC y est aussi explicité.

En partant de droite, l'accumulateur lithium-ion impose la tension aux bornes de l'application, dont le courant est additionné à celui du convertisseur DC/DC pour former la réaction du système sur l'accumulateur lithium-ion. Ainsi, le bloc de couplage monophysique est défini par :

$$U_{app} = U_{li} \quad (4.1)$$

$$I_{li} = I_{app} - I_{s4} \quad (4.2)$$

Le convertisseur DC/DC et son inductance associée L_4 sont contrôlés afin d'imposer la contribution du supercondensateur à l'alimentation de l'application. Détaillée plus loin, la stratégie de réglage du système a comme tâche, par la variable d'intervention

$I_{I_{4ref}}$:

- de ne pas apporter de contribution énergétique du supercondensateur lorsque ce dernier est déchargé ;

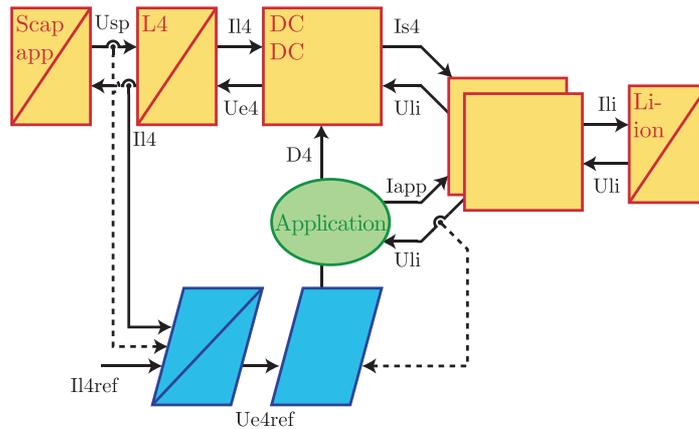


FIGURE 4.4 : REM de l'alimentation de l'application par les deux accumulateurs d'énergie

- de compenser intégralement la consommation de l'application autrement.

De cette manière, il est possible d'exploiter les qualités du supercondensateur ; d'une part, il s'agit de profiter de la plus longue durée de vie proposée par ce dernier (environ mille fois supérieure aux accumulateurs électrochimiques) ; d'autre part, l'auto-décharge des accumulateurs lithium-ion étant plus faible que celle des supercondensateurs, il est intéressant de prélever en premier lieu l'énergie stockée dans ces derniers.

4.4 CHARGE RAPIDE

La composition de l'accumulateur hybride étant définie, tout comme la connexion des accumulateurs et l'alimentation de l'application, l'accent va être porté sur la recharge de l'accumulateur hybride.

Dans un premier temps, il s'agit de dissocier les deux différentes façons de procéder à la recharge de l'accumulateur hybride : En effet, des contraintes qui ont été posées en préambule de ce chapitre, il est possible de définir :

- une recharge *lente* assimilée à la recharge de l'accumulateur électrochimique lithium-ion. Après la recharge dont la durée se compte en heures, l'accumulateur hybride se trouve dans un état totalement chargé ;
- une recharge *rapide* d'une durée de quelques secondes ; cette dernière ne permet que de remplir de manière partielle les réserves d'énergie, en ne chargeant que l'accumulateur supercapacitif. De cette manière, une quantité significative d'énergie est stockée et permet l'usage immédiat du système à alimenter.

Dans le but de se focaliser sur la fonctionnalité liée à la recharge rapide, la recharge lente est considérée comme un processus complètement indépendant de tout le reste du système. La figure 4.5 représente le sous-système lié à la charge lente de l'accumulateur lithium-ion depuis le réseau électrique basse tension, qui ne sera pas détaillé.

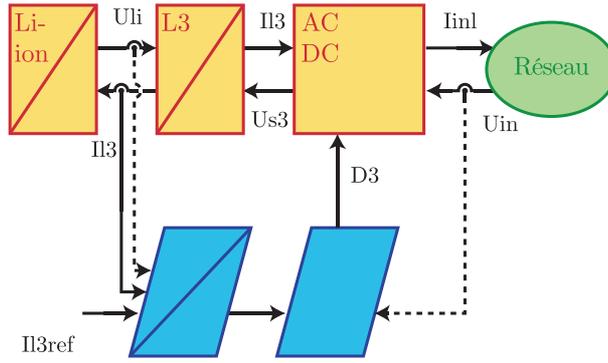


FIGURE 4.5 : Représentation du système de charge lente

4.4.1 Charge du supercondensateur

Au contraire de la recharge lente qui s’opère sous des conditions de puissance relativement modestes, la recharge rapide consiste en un transfert d’énergie rapide entre le chargeur et le receveur (accumulateur hybride). En guise de comparaison, et en se basant sur contraintes formulées en début de chapitre, là où la charge de l’accumulateur électrochimique prend 2 heures, la charge rapide du supercondensateur se déroule en dix secondes environ. Même si l’énergie chargée dans cet élément représente le 5% de celle stockée dans l’accumulateur électrochimique, le transfert requiert une puissance moyenne 36 fois plus élevée que celle requise par la charge complète.

L’accumulateur hybride est défini de sorte à ce qu’une telle recharge soit tolérée par un de ses composants, le supercondensateur. L’accumulateur lithium-ion n’est donc pas touché par la recharge rapide, étant donné que la puissance admissible à la recharge de ce dernier est faible. C’est pour cette raison que, dans un but de simplification, le comportement de ce dernier ne sera pas abordé dans les paragraphes qui suivent, qui sont dédiés à la charge rapide, et ce jusqu’à la page 83.

Afin de décrire le comportement à la recharge du supercondensateur, ce dernier a été modélisé de manière simple : un condensateur de capacité C_s connecté en série avec une résistance de valeur R_s , comme représenté à la figure 4.6. Ce modèle ne tient évidemment pas compte des phénomènes comme l’effet de la double couche ou de fuite, mais permet une mise en évidence claire des limites de la charge rapide de ce dernier. Au-delà des propriétés de capacité et de résistance du modèle, le supercondensateur est aussi caractérisé par sa tension nominale $U_{scmax} = 2.7V$, ainsi que son état de charge k_{SOC} défini par les relations suivantes :

$$k_{SOC} = \frac{4}{3} \left(\frac{U_{sc}^2}{U_{scmax}^2} - 0.25 \right) \quad t.q. \quad \begin{cases} k_{SOC} = 1 & U_{sc} = U_{scmax} \\ k_{SOC} = 0 & U_{sc} = 0.5U_{scmax} \end{cases} \quad (4.3)$$

Cette façon de procéder permet de borner la tension aux bornes de supercondensateur à des valeurs comprises entre la 50% et 100% de la tension nominale. Ceci a un intérêt dans le sens où il est difficile d’exploiter des tensions très basses pour l’alimen-

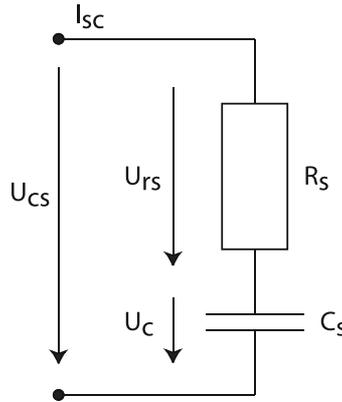


FIGURE 4.6 : Modèle simplifié du supercondensateur

tation d'un dispositif. Cependant, la capacité de l'élément qui n'est pas exploitée (entre 0V et $\frac{U_{scmax}}{2}$) ne représente que 25% de l'énergie totale.

4.4.1.1 Phases de charge

La figure 4.7 illustre le comportement du supercondensateur lorsque ce dernier est soumis à une charge. Cette dernière se déroule, dans une première phase, sous la condition de courant de charge constant de valeur I_{sc} . Cette phase, nommée *phase de charge rapide*, débute simultanément avec l'imposition du courant de charge de valeur constante. L'égalité de la tension totale vue aux bornes de l'accumulateur (courbe bleue) avec la valeur de tension maximale de l'élément (U_{scmax}) marque la fin de la phase de charge rapide. A partir de cet instant, il n'est plus possible de contraindre l'intensité du courant de charge à la valeur fixée plus haut sans que la tension mesurée aux bornes de l'accumulateur ne dépasse U_{scmax} . La durée de cette phase, qui dépend des caractéristiques ainsi que de l'amplitude du courant de charge, est définie comme :

$$t_{fc} = C_s \frac{U_{scmax} - 2R_s I_{sc}}{2I_{sc}} \quad (4.4)$$

A la fin de cette phase, la tension aux bornes de la cellule capacitive U_c n'est pas égale à la valeur nominale du composant, mais à $U_{scmax} - R_s I_{sc}$. Autrement formulé, le supercondensateur n'est pas complètement chargé à cet instant. L'énergie qui a été stockée durant l'intervalle t_{fc} vaut alors :

$$W_{fc} = \frac{1}{2} C_s \left[(U_{scmax} - R_s I_{sc})^2 - \frac{U_{scmax}^2}{4} \right] \quad (4.5)$$

Durant le même intervalle, la résistance R_s a dissipé une partie de l'énergie qui a été transférée :

$$W_{Lfc} = t_{fc} R_s I_{sc}^2 \quad (4.6)$$

$$= \frac{R_s I_{sc} C_s}{2} (U_{scmax} - 2R_s I_{sc}) \quad (4.7)$$

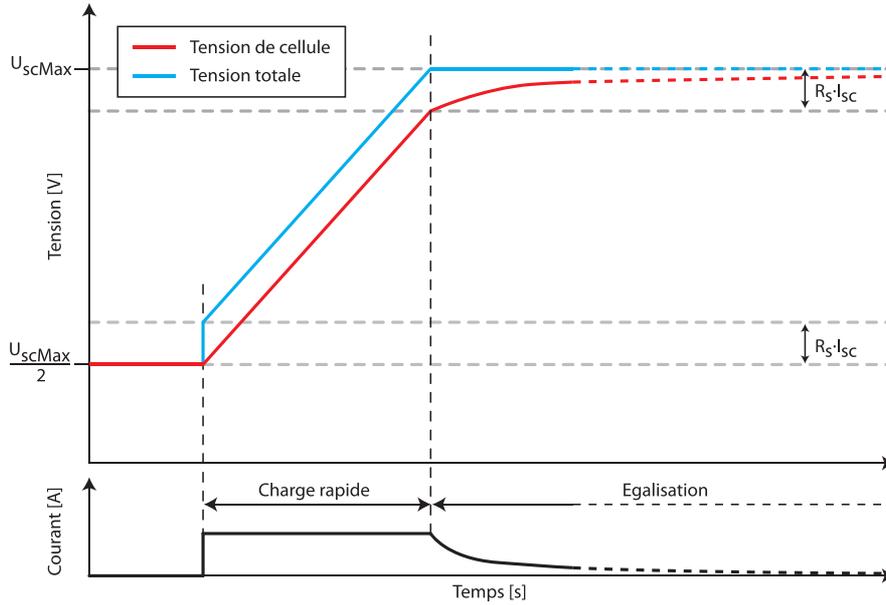


FIGURE 4.7 : Charge rapide du supercondensateur

La seconde phase de charge, intitulée *égalisation*, débute alors. Durant cette dernière, la tension nominale de l'accumulateur U_{scmax} est appliquée à ses bornes. Il n'est plus possible d'imposer un courant constant, et, par conséquent, la durée de cette phase de charge peut être évaluée de manière similaire à celle de la charge d'un circuit RC (résistance condensateur), caractérisée par sa constante de temps :

$$\tau = R_s C_s \tag{4.8}$$

Durant cette phase d'égalisation, la quantité additionnelle d'énergie stockée au sein de la cellule capacitive vaut :

$$W_{eq} = \frac{C_s}{2} \left(I_{sc}^2 R_s^2 - 2 I_{sc} R_s U_{scmax} \right) \tag{4.9}$$

Durant cette même phase, l'énergie dissipée dans la résistance R_s est définie par :

$$W_{Leq} = \frac{1}{2} C_s R_s^2 I_s^2 \tag{4.10}$$

4.4.1.2 Durée de la charge

Selon la distinction des deux phases de charge présentées ci-dessus, seule la durée de la phase de charge rapide est contrôlable. Il n'est pas possible d'influencer la durée de la seconde phase. C'est pour cette raison que, lors de développements qui vont suivre, seule la phase de charge rapide sera considérée. La figure 4.8 met en évidence la contribution de chaque phase de charge au transfert de l'énergie.

Selon cette représentation, plus le courant de charge rapide est faible, plus la durée de cette phase est importante. Comme conséquence directe de la faible valeur du cou-

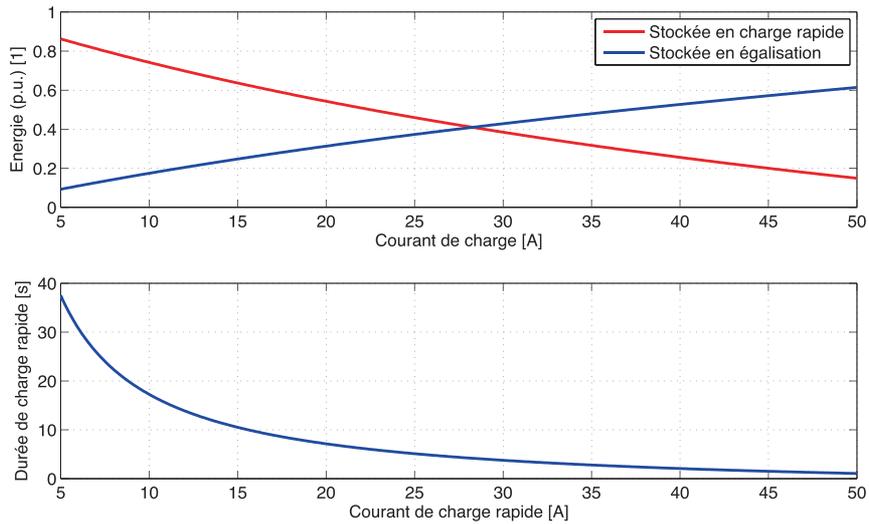


FIGURE 4.8 : Répartition de la transmission de l'énergie par phase de charge

rant, la chute de tension sur la résistance est plus faible et la majorité de l'énergie est chargée durant la première phase.

A l'inverse, plus le courant de charge rapide est élevé, plus la durée de la phase de charge rapide est courte ; ceci pour deux raisons. Premièrement, et c'est une des propriétés du condensateur, la durée de charge du condensateur est proportionnelle à l'amplitude du courant qui lui est imposé. Deuxièmement, la chute de tension sur la résistance placée en série à la cellule est, elle aussi, proportionnelle au courant de charge, ce qui a pour conséquence que la condition de fin de charge rapide apparaisse plus tôt sous fort courant. Cette seconde raison, qui justifie une fin prématurée de la phase de charge rapide, explique aussi que la quantité d'énergie stockée durant cette phase soit plus faible.

Ainsi, même s'il est absolument nécessaire de s'affranchir de la phase d'égalisation afin de garantir une charge rapide, cela a un coût, notamment sur la quantité d'énergie qu'il est possible de stocker en un cycle de charge. On définit ici le *déficit en énergie* k_{fc} comme étant le rapport entre la quantité d'énergie qui peut être stockée durant la phase de charge rapide uniquement et la quantité d'énergie qui peut être stockée sur le cycle de charge complet. Ainsi :

$$k_{fc} = \frac{W_{fc}}{W_{fc} + W_{eq}} \quad (4.11)$$

Sur l'exemple présenté à la figure 4.8, une charge rapide d'une durée de 10 secondes, réalisée à l'aide d'un courant d'environ 15A, ne permet pas de charger l'accumulateur complètement et entraîne un déficit en énergie $k_{fc} = 28\%$ par rapport à une charge lente¹.

1. Paramètres : $U_{scmax} = 2.7V$, $C_s = 150F$, $R_s = 20m\Omega$

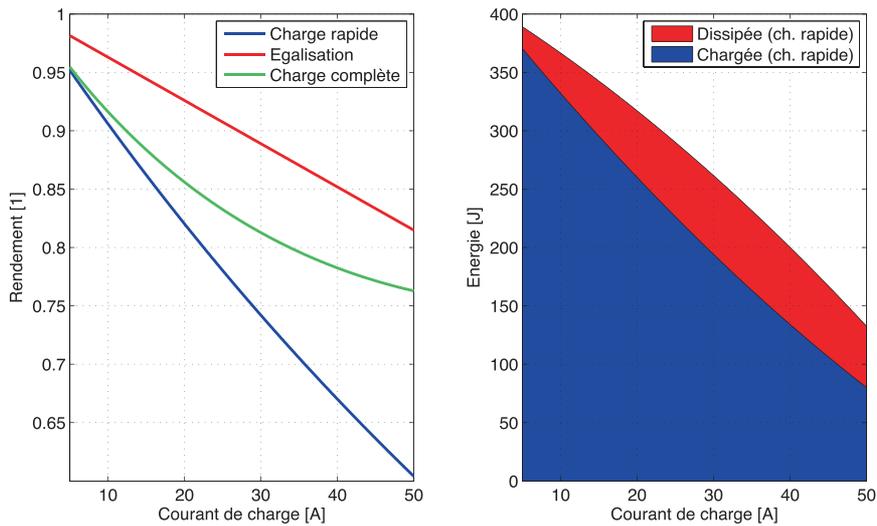


FIGURE 4.9 : Répartition de la transmission de l'énergie par phase de charge

4.4.1.3 Rendement de la charge

Au-delà du fait que la quantité d'énergie stockée lors de la charge rapide soit plus faible, il est possible de mettre en évidence le rendement de ce processus. Jusqu'à présent, seule la part de l'énergie qui est stockée au sein de la cellule capacitive a été abordée. Cette dernière est une conséquence de l'arrêt du processus de charge en fin de charge rapide et n'est pas une expression directe de pertes. Le rendement du transfert énergétique de la charge rapide est défini comme suit :

$$\eta_{fc} = \frac{W_{fc}}{W_{fc} + W_{Lfc}} \quad (4.12)$$

De la même manière, le rendement de la phase d'égalisation est donné comme :

$$\eta_{eq} = \frac{W_{eq}}{W_{eq} + W_{Leq}} \quad (4.13)$$

La figure 4.9 présente le rendement des phases de charge, qui décroissent en fonction de l'amplitude du courant de charge. Il est primordial de dissocier le déficit d'énergie stockée qui a été décrit ci-dessus du rendement du transfert à proprement parler. Sur la partie de droite de la figure, le déficit d'énergie est défini, pour un courant de charge donné, comme le rapport entre la partie bleue et la quantité maximale d'énergie stockable (environ 400J) alors que le rendement est défini par le rapport entre la partie bleue et la somme des parties bleue et rouge.

4.4.2 Alimentation en énergie

Lors de la charge, les sollicitations de l'accumulateur qui se voit être chargé, mais aussi de la source d'approvisionnement en énergie sont importantes. Le rendement du

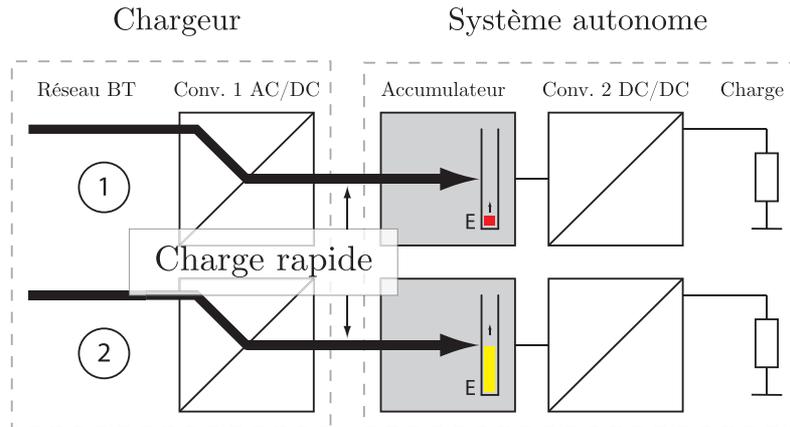


FIGURE 4.10 : Principe de fonctionnement de la charge rapide par alimentation directe

transfert d'énergie s'en trouve largement affecté au niveau de l'accumulateur lui-même, comme cela vient d'être démontré, mais aussi au niveau de la source fournissant l'énergie à l'accumulateur lors de sa charge. C'est une des raisons qui justifie l'examen des deux possibilités principales d'approvisionnement de l'énergie au niveau du chargeur.

4.4.2.1 Alimentation directe

La première solution qui permet la recharge rapide de l'accumulateur hybride via le réseau électrique consiste en l'ajout d'un convertisseur AC/DC entre le réseau alternatif domestique et l'accumulateur hybride. Le principe de fonctionnement de cette dernière est présenté à la figure 4.10.

Cette solution offre l'avantage de la simplicité. En effet, l'usage d'un unique convertisseur permet théoriquement de résoudre le problème de la charge rapide. Cependant, dans la pratique, des inconvénients majeurs sont relevés :

- Les besoins en puissance sont reportés intégralement sur le réseau électrique basse tension. Ceci n'induit pas de conséquences directes tant que la puissance nécessaire n'excède pas quelques kilowatts. Ce report implique cependant un dimensionnement de la chaîne d'alimentation en énergie pour la puissance maximale de la charge rapide ;
- La conversion opérée par le convertisseur 1 de la figure précédente est idéalisée. Dans le cas qui est traité ici, le ratio de tension entre l'entrée (300V) et la sortie (1-3V) du convertisseur est de l'ordre de plusieurs centaines. Ajoutée à cela la puissance élevée qui est nécessaire pour effectuer une charge rapide, l'hypothèse de l'usage d'un unique convertisseur devient improbable. Ainsi, la présence de plusieurs étages de conversion devient nécessaire et chaque convertisseur intermédiaire doit être dimensionné pour la puissance maximale du transfert d'énergie.

4.4.2.2 Etage tampon

La seconde approche consiste en l'ajout d'un accumulateur d'énergie au sein du dispositif qui assure la recharge de l'accumulateur supercapacitif. De cette manière,

l'énergie nécessaire à la charge rapide ne circule qu'entre les deux accumulateurs via un convertisseur DC/DC, comme représenté à la figure 4.11. Le réseau domestique et le convertisseur AC/DC associé sont déchargés des contraintes en puissance liées à la charge rapide ; ceci résout un des problèmes posé par l'approche précédente.

En se basant sur l'illustration de l'alimentation par étage tampon (fig. 4.11) ainsi que le détail des sollicitations en courant des accumulateurs (fig. 4.12), le fonctionnement peut être décrit ainsi :

1. l'accumulateur au niveau du chargeur est plein, alors que l'accumulateur hybride est vide ;
2. le transfert d'énergie peut avoir lieu entre les deux accumulateurs. Le premier (côté chargeur, courant négatif) se vide, alors que le second (côté système autonome, courant positif) se charge. Le processus est géré par le convertisseur 2, qui reste activé durant toute la phase de charge. Durant le transfert, la puissance électrique qui transite entre les accumulateurs est importante ;
3. une fois que l'accumulateur 1 est vide (et respectivement l'accumulateur 2 est partiellement plein), le convertisseur 2 est désactivé et la charge rapide prend fin ;
4. dès lors, le système autonome peut être déconnecté du chargeur. L'accumulateur 2 alimente le système autonome, alors qu'au niveau du chargeur le convertisseur 1 est activé afin de permettre la charge lente de l'accumulateur 1. Les deux processus se déroulent sous une faible puissance.

Cette approche, similaire aux systèmes dits de *biberonnage* [39, 40] appliqués notamment pour la propulsion électrique, permet de décharger le réseau électrique alternatif des contraintes élevées en puissance, inhérentes à la recharge rapide de l'accumulateur hybride. Malgré le coût d'un accumulateur additionnel de type puissance (supercondensateur), placé au niveau du chargeur, l'intérêt de cette approche est de limiter l'étendue du système dans lequel une puissance importante circule. La figure 4.13 met en évidence le découplage existant entre la charge de l'accumulateur côté chargeur, et la charge rapide de l'accumulateur hybride.

4.4.3 Définition du convertisseur de charge rapide

Selon la solution retenue au point 4.4.2, le convertisseur 2 représenté à la figure 4.11 est le seul élément qui, hormis les accumulateurs, est traversé par le flux d'énergie lors de la charge rapide. Dès lors, il est évident que le choix de la topologie de conversion revêt une importance toute particulière dans le rendement du transfert d'énergie entre les deux accumulateurs. Etant donné que le choix d'un convertisseur ne peut être abordé qu'en considérant les éléments y étant directement connectés, trois types de solutions, qui correspondent aux conversions DC/DC fondamentales [41], sont listées au tableau 4.2. La variable que l'on souhaite imposer durant le transfert d'énergie est le courant de charge rapide ; ce dernier est d'ailleurs un élément-clé dans le dimensionnement du convertisseur. En fonction de la topologie choisie, la limitation de cette consigne peut être requise, selon [42].

Les deux premières solutions recensées consistent à faire usage d'un convertisseur abaisseur ou éleveur de tension. Les contraintes qu'imposent ces derniers sur les accumulateurs d'énergie du chargeur et de l'application concernent les tensions de ces

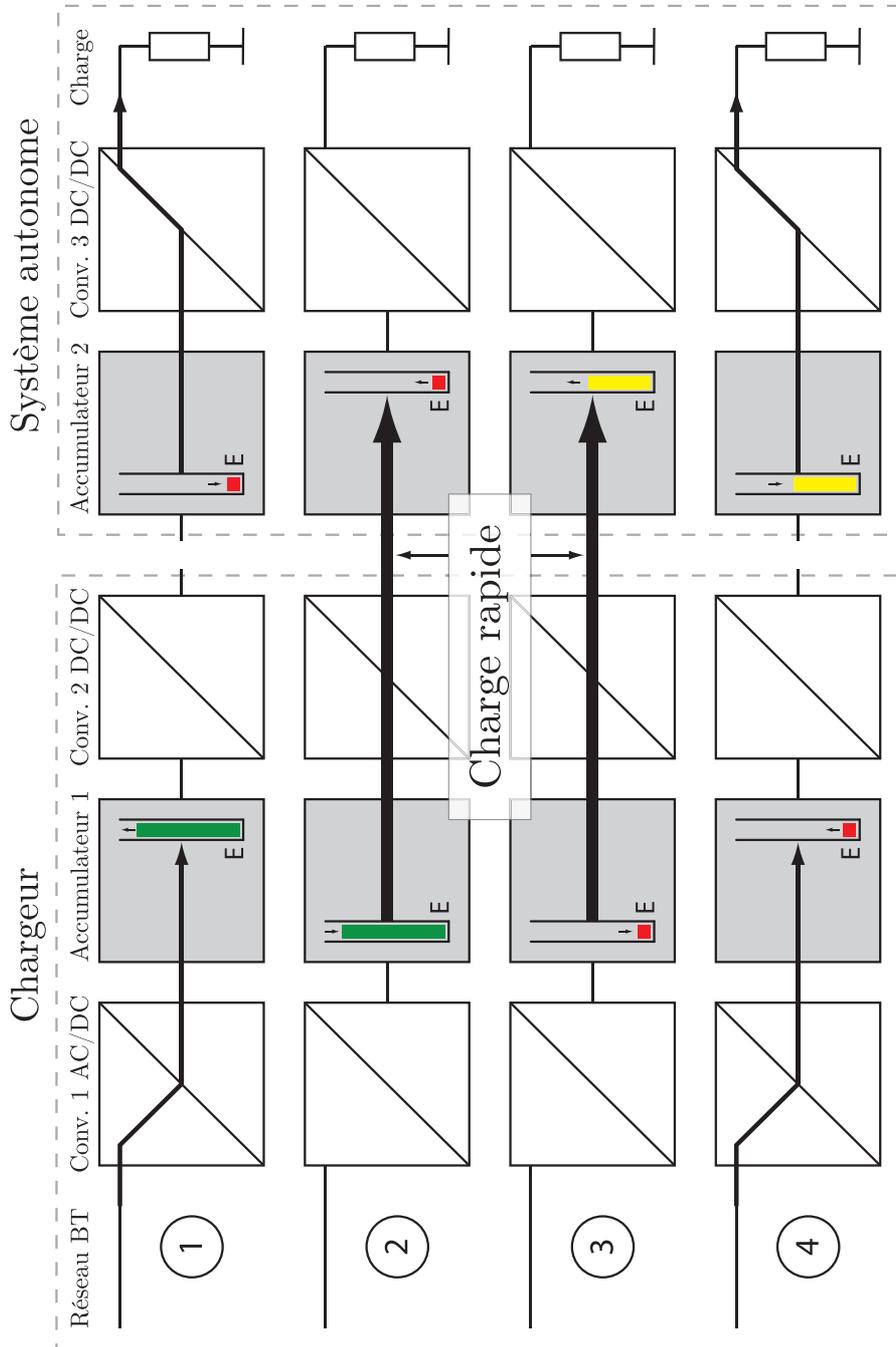


FIGURE 4.11 : Principe de la charge rapide par étage tampon

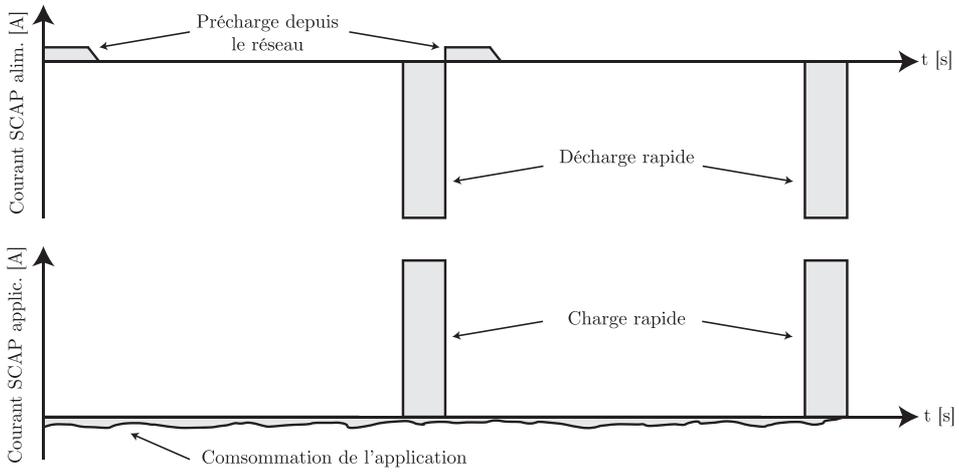


FIGURE 4.12 : Principe de la charge rapide - détail des courants pour chaque accumulateur

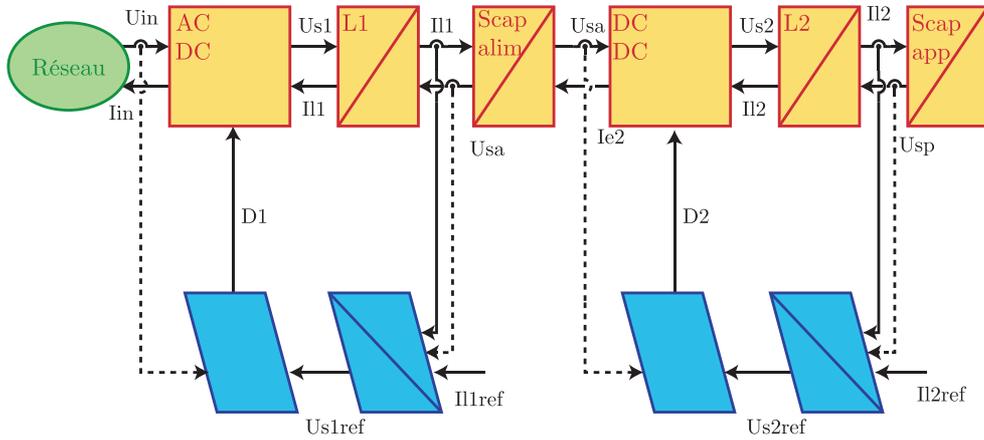


FIGURE 4.13 : Représentation de la chaîne de charge rapide

Solution	Condition accum.	Complexité	Rendement
Convertisseur abaisseur (Buck)	$U_{in} > U_{out}$	simple	moyen
Convertisseur élévateur (Boost)	$U_{in} < U_{out}$	simple	moyen
Double conversion (Boost-Buck)	\emptyset	moyenne	faible

TABLE 4.2 : Comparaison de solutions de conversion pour la charge rapide

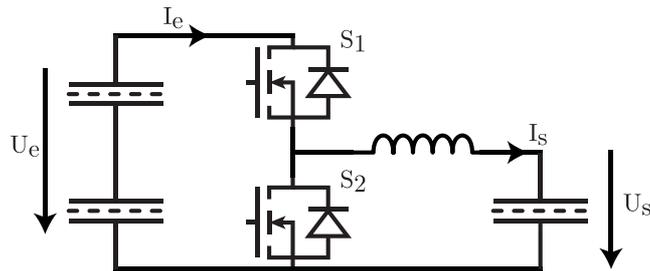


FIGURE 4.14 : Topologie de conversion retenue pour la charge rapide

derniers. Ainsi, dans le premier cas, la tension de l'accumulateur côté chargeur doit être en tout temps supérieure à celle de l'accumulateur côté application, alors que c'est l'inverse dans le second cas.

La troisième solution listée permet de s'affranchir des contraintes sur les niveaux de tension des accumulateurs. Pour ce faire, cette dernière se compose d'un convertisseur élévateur qui prélève de l'énergie dans l'accumulateur côté chargeur, ainsi que d'un convertisseur abaisseur, connecté à l'accumulateur côté système à alimenter. Bien que, dans ce cas, aucune contrainte n'existe au niveau des tensions des accumulateurs, la double conversion de l'énergie implique un rendement énergétique de conversion inférieur au prix d'une complexité double.

Le convertisseur n'étant pas l'élément clé de cette étude, une comparaison extensive (fonctionnalité, rendement, etc.) n'a pas été entreprise. Toutefois, le choix de la solution à implémenter a été guidé par les arguments suivants :

- la complexité et le rendement moyen proposé par la solution 3 excluent cette dernière du choix ;
- les solutions 1 ou 2 proposent une complexité et un rendement similaire. De plus, dans chacun des cas, l'un des accumulateurs doit proposer une tension plus élevée que l'autre ;
- l'accumulateur à tension élevée qui est requis dans le cadre des solutions 1 et 2 est réalisé par une combinaison série des cellules identiques, ce qui implique l'usage d'un dispositif d'équilibrage permettant une répartition adéquate de la charge entre les deux cellules, d'où une complexité et un volume plus important.

Ainsi, pour des raisons de volume et de poids, l'accumulateur côté système à alimenter sera composé d'une unique cellule, alors que celui côté chargeur sera composé de deux cellules supercapacitives connectées en série. En suivant ce raisonnement, seule la solution 1, le convertisseur abaisseur, permet l'échange d'énergie entre les deux accumulateurs. C'est donc celle qui est retenue, dont la figure 4.14 en illustre le principe.

4.4.3.1 Illustration du transfert idéalisé

La topologie de conversion étant définie, le déroulement du transfert d'énergie entre les accumulateurs peut être décrit. Une simulation du transfert, sous hypothèses de traitement pseudo continu et d'absence de pertes, est représenté en figure 4.15.

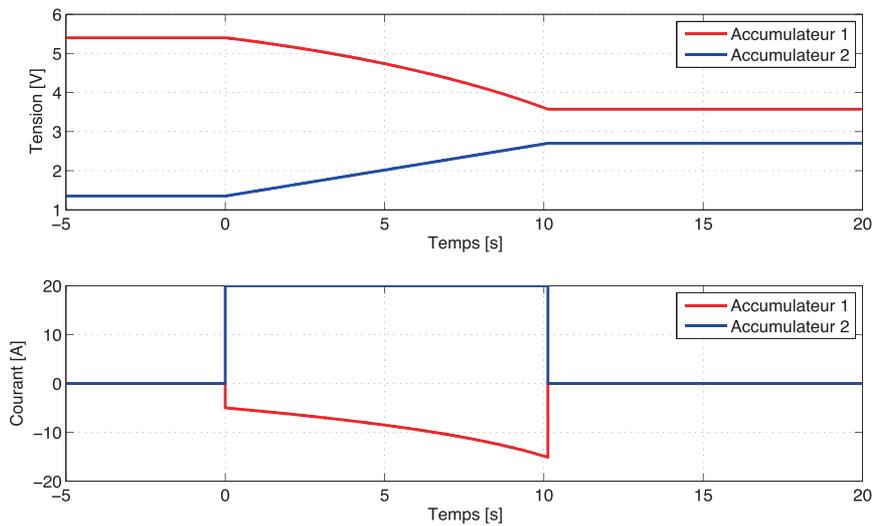


FIGURE 4.15 : Charge rapide sous conditions idéalisées

Les remarques ci-après décrivent le déroulement de la charge rapide, sous conditions de rendement unitaire :

AVANT LA CHARGE l'accumulateur côté chargeur est dans un état chargé. La tension à ses bornes vaut 5.4V , du fait que cet élément est constitué par la mise en série de deux supercondensateurs. L'accumulateur côté application est dans un état déchargé ; la tension à ses bornes 1.35V , soit $\frac{U_{scmax}}{2}$.

LORS DE LA CHARGE l'accumulateur du chargeur se décharge (la tension à ses bornes diminue), alors que l'accumulateur côté application se charge (sa tension augmente). La valeur du courant est imposée à l'accumulateur côté application. Par contre, au fur et à mesure de l'avancement de la charge, le courant moyen prélevé sur l'accumulateur côté chargeur croît. Ceci est la conséquence de deux phénomènes : premièrement, la puissance prélevée du côté système est croissante (courant constant et tension croissante) ; deuxièmement, la tension de l'accumulateur côté chargeur décroît (il se décharge). Afin de satisfaire le bilan de puissance, le courant prélevé sur cet accumulateur doit être croissant.

APRÈS LA CHARGE la tension de l'accumulateur côté application est égale à U_{scmax} , la tension nominale de ce dernier ; il est donc chargé. La tension du second accumulateur vaut environ 3.5V ; il est donc déchargé.

4.4.4 Considérations sur le rendement

Selon la topologie d'alimentation en énergie retenue, l'accumulateur doit contenir suffisamment d'énergie pour permettre la recharge de l'accumulateur du système. Le choix et dimensionnement de l'accumulateur d'entrée sont des éléments de première importance dans l'étude de la recharge rapide. En effet, un accumulateur sous-dimensionné ne permettra pas de transférer la quantité d'énergie désirée à l'accumulateur de l'application mobile, tandis qu'un accumulateur sur-dimensionné rendrait le système trop onéreux.

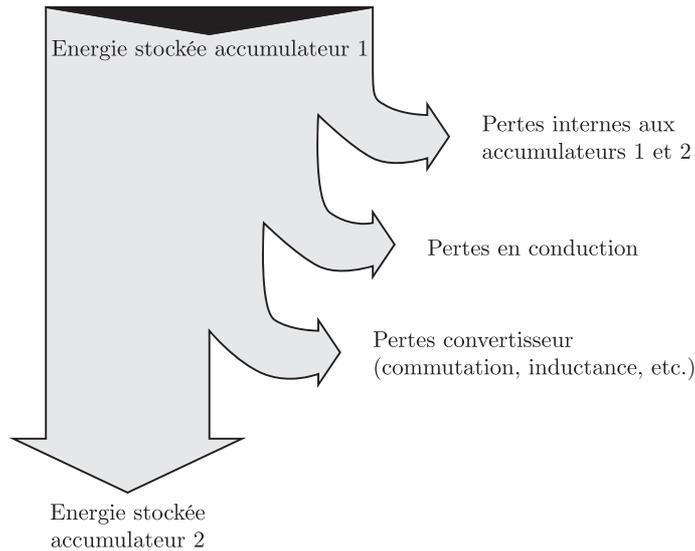


FIGURE 4.16 : Pertes occasionnées par la charge rapide

Dans un système idéal, toute l'énergie stockée et fournie par l'accumulateur côté chargeur est transférée à l'accumulateur du système à alimenter. Dans un système réel, le rendement du transfert d'énergie n'est pas unitaire ; la figure 4.16 présente la répartition de l'énergie entre les différents sous-systèmes :

PERTES INTERNES DES ACCUMULATEURS. Le fait d'injecter ou d'extraire l'énergie d'accumulateurs ne se fait jamais de manière idéale, comme cela a été abordé au point 4.4.1 dans le cadre de la charge rapide du supercondensateur. Les pertes internes de l'accumulateur côté chargeur peuvent être modélisées. Pour ce faire, le modèle résistance et condensateur en série, qui avait été utilisé alors, est repris.

PERTES CONVERTISSEUR. Les pertes au sein du convertisseur sont réparties en trois catégories : les pertes par conduction, par commutation et des passifs. La première regroupe la somme des pertes induites par la conduction d'un courant au sein des semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont dans un état passant, sont caractérisés par leur résistance de passage R_{dsON} . La seconde catégorie regroupe les pertes dues aux phénomènes de commutation (changement d'un état bloqué à passant et inversement). La dernière recense, dans ce cas, les pertes dues à la conduction dans l'inductance du convertisseur.

AUTRES PERTES EN CONDUCTION. Les singularités du système qui est à l'étude impliquent l'usage de connexions non permanentes entre le système à alimenter et le chargeur. La présence de connecteur est nécessaire et ces derniers présentent une résistance de passage qui n'est pas négligeable. A celle-ci s'ajoute une résistance additionnelle qui est due à la circulation du courant sur les circuits imprimés sur lesquels sont soudés les différents composants.

4.4.4.1 Modèle de pertes

Les sources de pertes étant identifiées et modélisées, l'évaluation du rendement de la charge rapide est possible. Alors que les pertes internes des accumulateurs et de

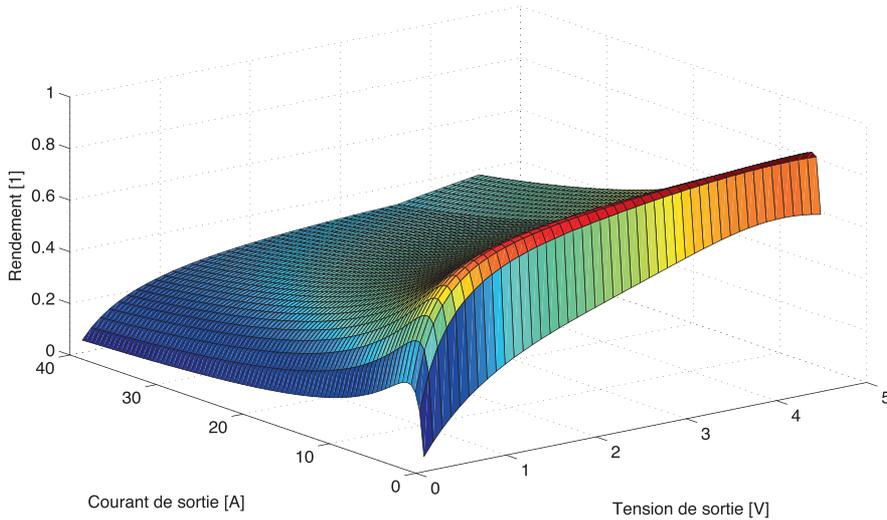


FIGURE 4.17 : Cartographie partielle du rendement du convertisseur

conduction ne sont dépendantes que du courant qui traverse les éléments dissipatifs, celles liées au convertisseur dépendent de plusieurs autres facteurs dont les tensions d'entrée et de sortie de ce dernier. Or, comme l'a montré la figure 4.15, le point de fonctionnement du convertisseur est à chaque instant différent, étant donné la charge et la décharge simultanée des accumulateurs.

Pour cette raison, il a été décidé de créer une cartographie du rendement du convertisseur, dont les détails sont reportés à l'annexe B. Cet outil, dont une représentation partielle des résultats est dépeinte en figure 4.17, permet d'évaluer le rendement du convertisseur pour toutes les combinaisons de tensions et courant.

4.4.4.2 Rendement global

Grâce au modèle de pertes, il est possible d'évaluer le rendement du processus complet de charge rapide. Pour ce faire, on définit le rendement global d'une conversion comme :

$$\eta_g = \frac{W_{fc}}{W_{fc} + \sum W_L} \quad (4.14)$$

La figure 4.18 présente le rendement global en fonction du courant de charge de l'accumulateur de sortie, ainsi que le rendement du convertisseur uniquement. En plus, la répartition des pertes d'énergie entre les différentes sources de pertes est définie. On note la part prépondérante des pertes (jusqu'à 45% de l'énergie consommée) au sein des accumulateurs. Ces dernières sont, pour tous les points de fonctionnement, au moins deux fois supérieures à celles engendrées par le convertisseur, ce qui conforte l'hypothèse formulée au § 4.4.3 à propos de l'importance relative du choix de la topologie du convertisseur de charge rapide au sein du système étudié.

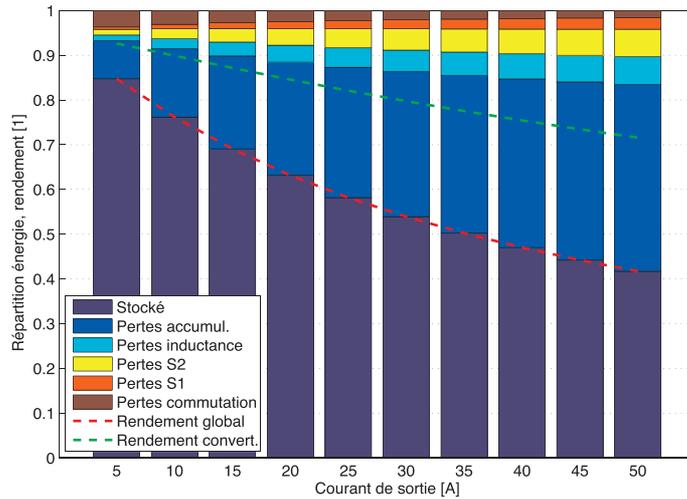


FIGURE 4.18 : Rendement global du processus de charge en fonction de courant imposé à l’accumulateur côté application et répartition des pertes

4.5 REPRÉSENTATION ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME

Le système dépeint tout au long des pages précédentes est décrit de manière complète en figure 4.19. Cette illustration, réalisée à l’aide du formalisme REM (annexe B), présente une disposition particulière des éléments qui reste proche de la fonctionnalité et la position physique de ces derniers au sein du système. A gauche le réseau électrique alternatif basse tension est, lui aussi, représenté comme une source d’énergie.

Au centre de cette figure, en trait rouge, est représentée l’interface physique entre les parties du système étudié :

LA PARTIE FIXE, à gauche, représente le chargeur. Ce dernier, alimenté par la source modélisant le réseau, se scinde en deux voies. La première, en haut, forme la chaîne d’alimentation pour la charge rapide de l’accumulateur hybride, décrite au § 4.4.2. Cette dernière est composée d’un premier convertisseur AC/DC assurant la conversion de l’énergie électrique entre le réseau et l’accumulateur d’énergie situé au niveau du chargeur. Finalement, dans cette chaîne d’alimentation rapide sont représentés le convertisseur de charge, abordé au § 4.4.3, rapide et son inductance. Située en dessous, la seconde chaîne d’alimentation est responsable de la charge lente de l’accumulateur du système autonome. L’utilité de cette dernière a été brièvement abordée au § 4.4. Elle est uniquement composée d’un convertisseur AC/DC et de l’inductance associée, qui permettent la conversion d’énergie électrique sous la forme requise afin de garantir la charge de l’accumulateur hybride.

LE SYSTÈME AUTONOME, à droite, comprend le système à alimenter et son accumulateur hybride, dont la composition et la connexion des éléments de stockage entre-eux ont été abordés au § 4.3.

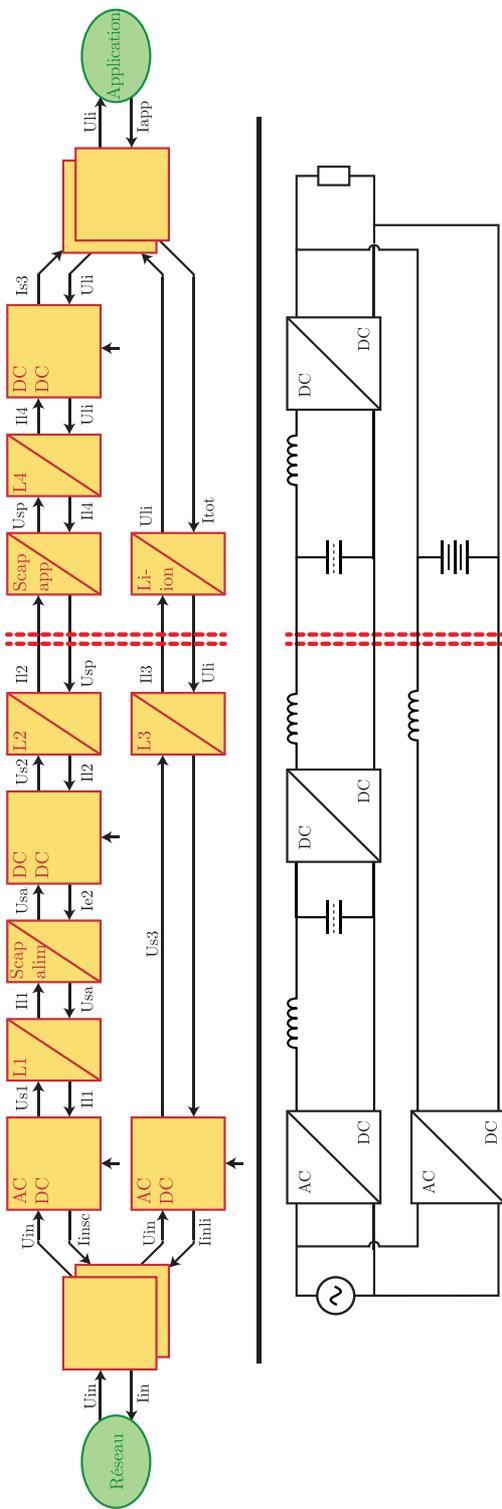


FIGURE 4.19 : REM et schéma électrique simplifié du système

4.5.1 REM et SMC

La figure 4.20 présente, sous une forme un peu différente, le même système. Cette seconde représentation permet, via l'inversion du système, de représenter sa structure maximale de commande (SMC). Contrairement à la représentation précédente, celle-ci se focalise sur le contrôle du dispositif, et notamment sur les voies d'action et sur la stratégie de commande de l'ensemble. Cette dernière ne permet pas de représenter les frontières physiques entre la partie fixe (chargeur) et mobile (système autonome).

On note l'indépendance totale du contrôle de chacun des 4 sous-ensembles qui forment système complet :

- Le contrôle de la charge lente (SS₄) comprend le convertisseur (et son inductance) interfaçant le réseau avec l'accumulateur lithium-ion. Le contrôle en courant du convertisseur est assuré par un régulateur de type PI dont la consigne en courant de référence est fournie par le bloc de stratégie.
- Le système de stockage hybride (SS₃) englobe le bloc de répartition qui modélise la connexion électrique de l'accumulateur lithium-ion au convertisseur d'interface qui permet le contrôle de la contribution de l'accumulateur supercapacitif. Le contrôle en courant du convertisseur est réalisé par un régulateur PI dont la consigne est définie par le bloc de stratégie.
- Le système de charge rapide (SS₂) comprend le convertisseur de charge rapide et son inductance, ainsi que l'élément supercapacitif (*Scap app.*) qui fait partie de l'accumulateur hybride. Le contrôle en courant du convertisseur est, une fois encore, assuré par un troisième régulateur PI. La consigne en courant pourrait être déterminée par un second régulateur PI, qui ferait alors office de régulation de tension du supercondensateur de l'application. Conformément aux considérations qui ont été formulées sur la charge rapide, cette dernière se déroule à courant constant, et la phase dite d'égalisation n'est donc pas utile. Dans ce sens, l'utilisation de deux régulateurs PI n'aurait pas de sens. Dans l'implémentation du système, seul le contrôle en courant du convertisseur de charge rapide est présent, sa consigne (I_{I2ref}) étant issue directement du bloc de stratégie.
- Le système de précharge du chargeur rapide (SS₁) est formé par le convertisseur assurant la connexion entre le réseau électrique et l'accumulateur supercapacitif localisé au niveau du chargeur. Le contrôle en courant de l'inductance et en tension de l'accumulateur supercapacitif est assuré par un réglage PI classique en cascade. Dans l'implémentation, le courant est limité à une valeur assurant que la puissance prélevée soit de l'ordre de grandeur de quelques watts, et la consigne de tension est fournie par le bloc de stratégie.

4.5.2 Stratégie

Le bloc de stratégie présenté à la figure 4.20 doit fournir une consigne pour chacun des sous-systèmes décrits dans le paragraphe précédent. Il s'agit de fournir : l'état de charge de l'accumulateur lithium-ion, courant délivré par l'accumulateur supercapacitif du système, le courant de charge rapide et la tension de référence de l'accumulateur supercapacitif du chargeur. Etant donné l'existence d'une connexion physique non permanente entre le chargeur et le système autonome, deux stratégies sont définies en fonction de l'état de la connexion.

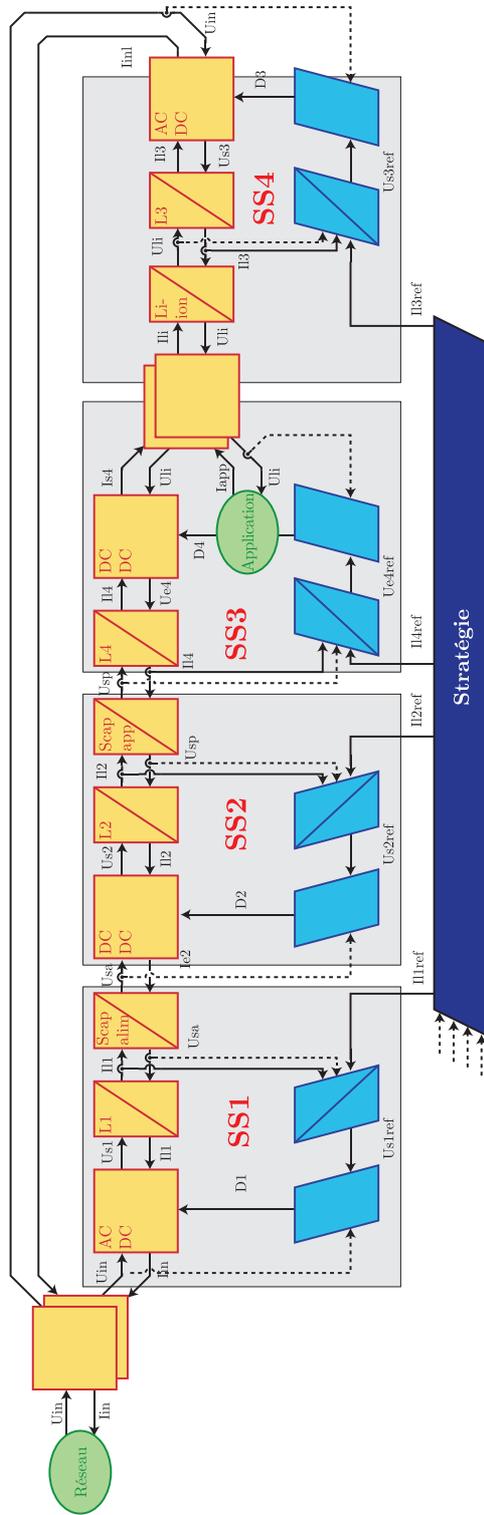


FIGURE 4.20 : REM et SCI du système

Cependant, la contribution de l'accumulateur supercapacitif, situé au niveau du système autonome, est la même, peu importe la connexion ou non du système avec le chargeur. Cette dernière dépend de l'état de charge de l'accumulateur. Tant que celui-ci n'est pas déchargé ($k_{SOC} > 0$), cet élément fournira l'intégralité de l'énergie consommée par l'application, rendant nulle la contribution de l'accumulateur lithium-ion. Dans ce cas, afin de respecter l'égalité des puissances de chaque côté de l'élément de conversion, la consigne fournie au sous-système 3 est définie comme :

$$I_{L_{ref}} = \frac{U_{li} I_{app}}{U_{sp}} \quad (4.15)$$

Afin de pouvoir garantir une charge rapide aussitôt que la connexion entre le chargeur et le système autonome est établie, l'accumulateur supercapacitif situé au niveau du chargeur doit être conservé dans un état chargé. Ainsi, la tension de consigne appliquée au sous-système 1 ne dépend pas de l'état de connexion et vaut $U_{saref} = 2U_{scmax}$, étant donné la configuration de l'accumulateur. Le corollaire à cela est que le convertisseur de précharge est actif y compris lors de la charge rapide du système autonome.

4.5.2.1 Systèmes déconnectés

Dans cet état, des connexions physiques sont rompues dans les sous-systèmes 2 et 4. Il va donc de soi que les consignes d'état de charge de l'accumulateur lithium-ion et de courant de charge rapide sont forcées à 0.

Dans le cas où l'état de charge de l'accumulateur supercapacitif de l'application est nul, sa contribution sera, elle aussi, nulle ($I_{L_{ref}} = 0$). L'intégralité des besoins en énergie de l'application sera fournie par l'accumulateur lithium-ion. Lorsque l'état de charge de l'accumulateur lithium-ion devient à son tour nul, il n'y a plus d'énergie disponible pour le fonctionnement du système autonome et ce dernier doit être rechargé.

4.5.2.2 Systèmes connectés

Dans ce cas-ci, les deux autres consignes des sous-systèmes doivent être définies. Au moment de la connexion des deux systèmes, on suggère l'approche suivante : proposer en premier lieu une charge rapide ($I_{I_{2ref}} = I_{sc}$), afin de fournir au système autonome la possibilité de fonctionner malgré le fait que la charge de son accumulateur hybride soit partielle. Ainsi, dès que la charge rapide prend fin (détection de la tension nominale aux bornes de l'accumulateur), le chargeur peut être déconnecté du système autonome.

Si la déconnexion n'a pas lieu, il est assumé qu'une charge longue est souhaitée. Dans ce cas, dès la fin de la charge rapide, le convertisseur gérant la charge lente (sous-système 4) est activé par le biais de la consigne $SOC_{ref} = 1$.

4.5.3 Dimensionnement énergétique de l'accumulateur hybride

Dans un premier temps, il s'agit de dimensionner l'accumulateur hybride du système autonome. Ce dernier, composé d'un accumulateur électrochimique lithium-ion

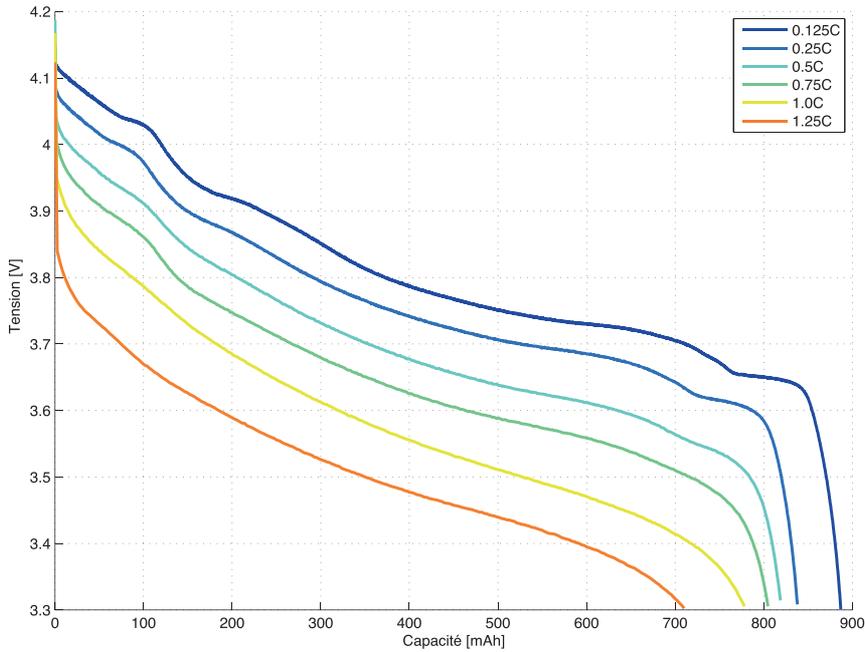


FIGURE 4.21 : Caractéristiques de l'accumulateur lithium-ion original

et d'un supercondensateur doit répondre aux contraintes qui ont été formulées en préambule de ce chapitre. La caractéristique principale de l'accumulateur original lors de la décharge est présentée en figure 4.21 à titre indicatif.

De ce graphique, on estime la capacité de l'accumulateur à $c_y = 800mAh$. Le contenu énergétique de ce dernier est défini :

$$W_{li-ion} = c_y |_{mAh} \langle U_{li-ion} \rangle 3.6 = 10.6kJ \quad (4.16)$$

La définition de la forme de l'accumulateur hybride qui est proposée au paragraphe 4.3.2 le décrit comme une composition de l'accumulateur original, afin de proposer un contenu énergétique du même ordre de grandeur que celui de l'accumulateur original, et d'un accumulateur supercapacitif qui permet la recharge rapide de 5% de la quantité d'énergie stockée dans le système original. Ainsi, l'énergie qui doit pouvoir être stockée dans le supercondensateur qui compose l'accumulateur hybride lors de la charge rapide vaut :

$$W_{scap} = 5\% \cdot W_{li-ion} = 532J \quad (4.17)$$

On définit donc la capacité utile de l'accumulateur supercapacitif, comme l'énergie qui peut être stockée en exploitant l'intervalle de tension dont le maximum est déterminé par la tension de fin de charge rapide, et le minimum par $U_{smin} = \frac{U_{smax}}{2}$. Des équations (4.4) et (4.5), on obtient la condition qui doit être satisfaite pour déterminer la capacité minimale :

$$R_s^2 t_{fc} I_s^3 - 2R_s t_{fc} U_{scmax} I_s^2 + \left(2W_{scap} R_s + \frac{3}{4} U_{scmax}^2 t_{fc} \right) I = W_{fc} U_{scmax} \quad (4.18)$$

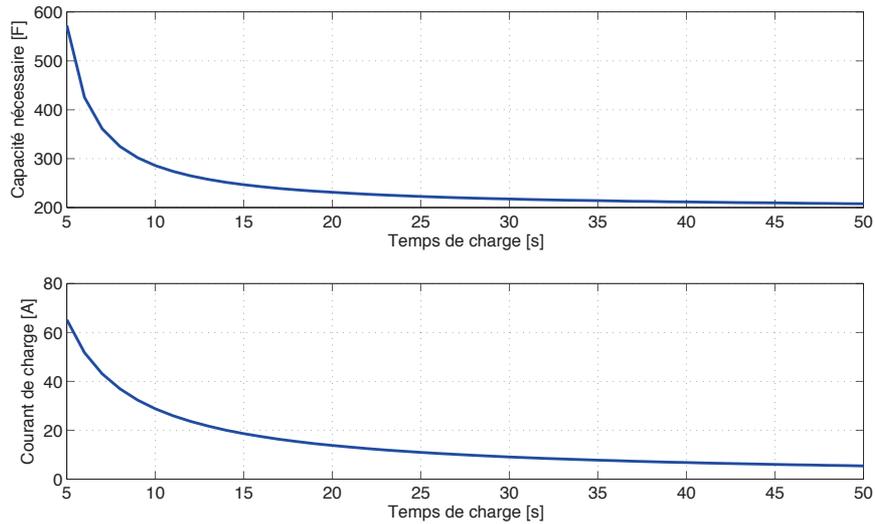


FIGURE 4.22 : Capacité minimale nécessaire en fonction du temps de charge rapide

Du courant de charge, on obtient la capacité requise par le biais de l'équation (4.4) :

$$C_s = \frac{2t_{fc}I_s}{U_{scmax} - 2R_sI_s} \quad (4.19)$$

La figure 4.22 montre l'évolution de la capacité minimale requise en fonction du temps de charge imposé, sous les conditions $R_s = 12m\Omega$, $W_{scap} = 532J$ et $U_{scmax} = 2.7V$. Pour la valeur de temps de charge considérée (10s), la capacité minimale qui doit être embarquée afin de garantir l'autonomie est de 285F, sous la condition de courant de charge de 29A.

On dissocie alors clairement 3 types d'énergie par rapport à l'accumulateur supercapacitif :

- l'énergie maximale pouvant être stockée par un supercondensateur de cette capacité : $W_0 = \frac{1}{2}C_sU_{smax}^2 = 1039J$;
- l'énergie utile en charge complète (pour une tension variant entre la tension nominale et la moitié de la tension nominale) : $W_{utile} = \frac{3}{8}C_sU_{smax}^2 = 779J$;
- l'énergie qui peut être emmagasinée lors de la phase de charge rapide : $W_{fc} = 532J$;

Cette distinction permet de mettre en évidence le fait que seule la moitié de l'énergie maximale stockée par le supercondensateur est utile lors de la charge rapide, selon les conditions qui ont été imposées. La quantité d'énergie qui n'est pas utile est accessible soit sous de faibles tensions de cellule (qui ne sont pas exploitées dans le cas présent), soit en abaissant la valeur du courant de charge.

1	FOR ChargeDuration FROM 5 TO 50
2	Choose suitable InputCap
3	FOR time FROM 0 TO END
4	ComputeConverterEfficiency()
5	ComputeCurrentsAndVoltages()
6	END FOR
7	IF ChargeEndedSuccessfully()
8	InputCap = InputCap - 1
9	GoTo 3
10	ELSE
11	Save (InputCap + 1)
12	END IF
13	END FOR

TABLE 4.3 : Algorithme pour la simulation de la charge

4.5.4 Dimensionnement énergétique de l'accumulateur du chargeur

L'énergie à stocker et les paramètres de l'accumulateur de sortie étant définis, il devient possible de procéder au dimensionnement de l'accumulateur supercapacitif côté chargeur. Pour ce faire, il est nécessaire de pouvoir estimer le rendement du transfert d'énergie entre l'accumulateur situé au niveau du chargeur et l'accumulateur hybride. Se fondant sur les considérations développées lors du § 4.4.4, ainsi que sur le modèle de pertes établi à l'annexe B, une simulation du processus de charge est générée, basée sur l'algorithme dépeint au tableau 4.3.

Ce dernier procède, pour un temps de charge donné par essais de charge rapide successifs. Lors de l'initialisation, l'utilisateur fournit à l'algorithme une valeur de capacité environ deux fois inférieure à la valeur de l'accumulateur à charger, choisie a priori, afin que le transfert d'énergie ne puisse pas se dérouler complètement. Pour cette valeur, le système va simuler le processus de charge. Avec un pas de temps fixe, le système va tout d'abord évaluer le point de fonctionnement du convertisseur, par le biais des tensions des accumulateurs et du courant imposé, puis calculer son rendement en ce point. Dans un second temps, l'évolution des paramètres électriques va être simulée durant cet intervalle temporel.

Une fois ces deux procédures effectuées, et les nouvelles valeurs électriques définies, le système effectue les mêmes procédures pour le pas de calcul suivant (10ms), jusqu'à ce qu'une des conditions de fin de charge interrompe le processus :

- soit la tension aux bornes de l'accumulateur côté système autonome atteint la valeur nominale (U_{scmax}), ce qui signifie que la charge rapide est arrivée à son terme ;
- soit la tension aux bornes de l'accumulateur côté chargeur atteint une tension limite basse ce qui signifie qu'il sera impossible que l'accumulateur côté système à alimenter atteigne la fin de la charge, par manque d'énergie au niveau du chargeur. La tension limite basse est définie comme étant la somme de la tension nominale de l'accumulateur côté système autonome et de la chute de tension au niveau du convertisseur.

Dans le cas où la charge n'atteint pas son terme, cela signifie que l'accumulateur côté chargeur ne contient pas assez d'énergie. Ainsi la simulation de la charge redémarre, en

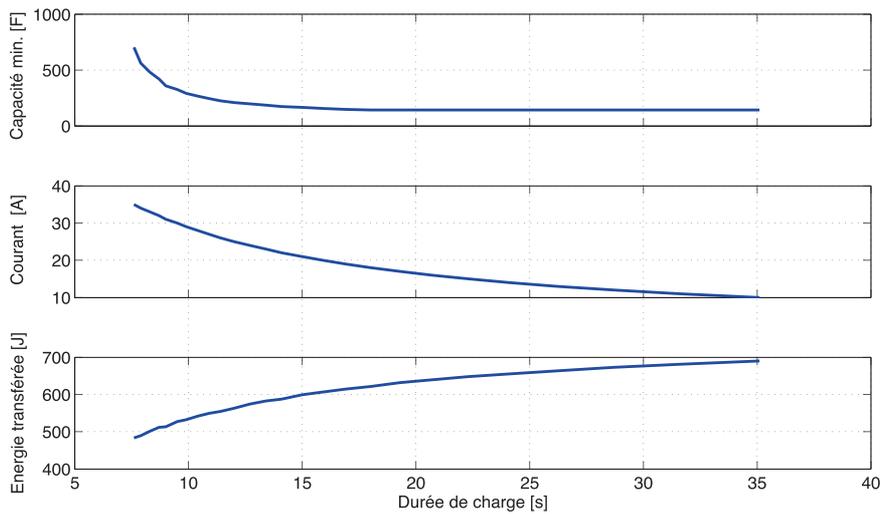


FIGURE 4.23 : Capacité minimale nécessaire au niveau du chargeur

ayant au préalable incrémenté la valeur de la capacité du chargeur. Lorsque la charge atteint son terme, la valeur de la capacité du chargeur peut être assimilée à la capacité minimale qui permet d'assurer la charge rapide de l'accumulateur hybride. La figure 4.23 montre le résultat de la méthode d'évaluation présentée ci-dessus. L'évolution de la capacité minimale requise en fonction du temps de charge est mise en évidence. D'une manière encore plus marquée que pour le dimensionnement de la capacité de l'accumulateur du système autonome, la valeur de la capacité du chargeur explose pour un temps de recharge très court, en raison des pertes du système. Pour un temps de charge donné de $t_{fc} = 10s$, la valeur minimale requise de capacité au niveau du chargeur vaut $C_e = 218F$ (obtenue par la mise en série de deux cellules de capacité double) afin de garantir la charge rapide de l'accumulateur côté système à alimenter de capacité $C_s = 285F$. Ainsi, on note, en tenant compte des tensions respectives des accumulateurs, que le contenu énergétique des éléments accumulateurs est 3 fois supérieur du côté chargeur que du côté système autonome.

4.5.5 Temps de transfert

Lors du dimensionnement de l'accumulateur supercapacitif côté système autonome, on note une nette influence du temps de charge sur la capacité minimale qui doit être garantie par cet accumulateur. Pour les mêmes raisons que décrites plus haut, un temps de charge court implique une capacité utile inférieure pour un même élément, étant donné que la chute de tension sur la résistance interne du supercondensateur est plus importante.

Sur la figure précédente, on note que le choix du temps de transfert d'énergie a une influence encore plus importante sur la taille de l'accumulateur situé au niveau du chargeur. En effet, plus la chute de tension qui se retrouve aussi sur la résistance interne de l'accumulateur est importante, plus ce dernier doit fournir, en plus de l'énergie qui

sera stockée, de l'énergie pour compenser les pertes ayant lieu au sein du système de conversion.

Ainsi, lors du dimensionnement, aucun compromis purement technique n'apparaît dans la procédure de dimensionnement des accumulateurs. Le seul vrai compromis qu'il est possible de mettre en évidence ici est le lien entre le coût et le temps de charge. Ainsi, un système de charge rapide qui propose un temps de charge court sous-entend la présence d'accumulateurs supercapacitifs de capacité importante. Leur poids, volume et coût, étant implicitement liés à la capacité, seront donc une conséquence directe d'un temps de charge court.

4.6 VALIDATION EXPÉRIMENTALE

La fin de ce chapitre s'axe sur la présentation de la réalisation expérimentale du système décrit au cours des pages précédentes. La validation expérimentale du convertisseur de charge rapide sera abordée, avec la comparaison du rendement mesuré et celui obtenu par le biais du modèle de pertes. Dans un second temps, le rendement de la charge complète sera confronté aux simulations du modèle complet de pertes.

4.6.1 Composants et accumulateurs

Afin de former l'accumulateur hybride, et comme cela a été mentionné plus haut, l'accumulateur lithium-ion d'origine est conservé. Le second composant de l'accumulateur hybride est un supercondensateur de $200F$, soit une capacité un peu inférieure à celle qui est requise afin de garantir les caractéristiques proposées au début du chapitre. Celui-ci est réalisé par la mise en parallèle de deux cellules identiques proposant chacune la moitié de la capacité.

De la même manière, l'accumulateur supercapacitif situé au niveau du chargeur propose une capacité de $150F$, composé de la mise en série de deux cellules supercapacitives de valeur $300F$, afin de garantir les conditions sur les tensions imposées par le convertisseur de charge rapide.

4.6.2 Chargeur rapide

Le convertisseur de charge rapide est le point central de la validation expérimentale. Ce dernier a été conçu spécialement pour cette application de charge rapide. En effet, les spécifications de ce dernier sont singulières ; il s'agit d'un convertisseur fort courant sous des conditions de faible tension.

La figure 4.24 présente une vue du convertisseur de charge rapide. A gauche, on distingue la partie *chargeur* qui comprend le convertisseur de charge rapide à proprement parler, son inductance, l'accumulateur supercapacitif, ainsi que le convertisseur de précharge au réseau. A droite, la partie mobile du système est composée de l'accumulateur hybride, ainsi que le convertisseur permettant de contrôler la contribution de supercondensateur à l'alimentation du système autonome (sous-système 3 sur la figure



FIGURE 4.24 : Convertisseur de charge rapide : chargeur (à gauche) et application (à droite)

4.20, p. 86). Au centre, le connecteur dans lequel circule le courant de charge rapide relie chacun de ces circuits, qui sont indépendants.

Le but n'étant pas de viser une description exhaustive du convertisseur, on note cependant les choix principaux qui ont guidé la conception de ce sous-système :

- Dans le but de simplifier l'alimentation du système, on fait l'impasse sur l'alimentation directe depuis le réseau. Le chargeur est alimenté sous une tension continue de 5V, avec une puissance limitée à 5W.
- La topologie de convertisseur utilisée est de type abaisseur synchrone, dont la commande et le contrôle sont assurés par un microcontrôleur embarqué sur le circuit (en haut à gauche). Dans le but de limiter la taille des passifs, la fréquence de commutation a été fixée à 100kHz. La conversion est assurée par des transistors MOSFET à montage en surface dont les caractéristiques sont orientées faible tension fort courant (24V, 200A) ; les pertes en conduction s'en trouvent réduites.
- L'inductance, de valeur $6\mu H$, a été le fruit d'un développement dédié à cette application. En effet, les pertes par conduction étant rédhibitoires dans ce système où les courants sont importants, une inductance de type planaire a été réalisée. Une vue éclatée de cet élément est présentée à la figure 4.25. Permettant la conversion de courants jusqu'à 50A, cette dernière a l'avantage de proposer un encombrement réduit par rapport à l'usage d'inductances toriques bobinées classiques.

Une mesure du rendement de la conversion est présentée en figure 4.26. Cette dernière présente le rendement du convertisseur dont la sortie est connectée successivement à deux résistances de puissance. L'alimentation est assurée par une source de tension dont la valeur est fixée à $U_e = 4V$. Dans le rendement du convertisseur sont incluses, en plus des pertes par conduction et par commutation, les pertes localisées dans l'inductance, les connexions externes ainsi que l'énergie consommée par le circuit de commande, drivers, etc.

Comparé au rendement du convertisseur issu par simulation du modèle de pertes, présenté en figure 4.18, le rendement mesuré est proche de celui qui a été estimé. Ainsi, pour le point de fonctionnement $I = 30A$, on note un rendement quasi-similaire (81% estimé, 82% mesuré). Cependant, aux faibles valeurs de courant de sortie, les pertes ont été sous-estimées, notamment en raison de la consommation importante

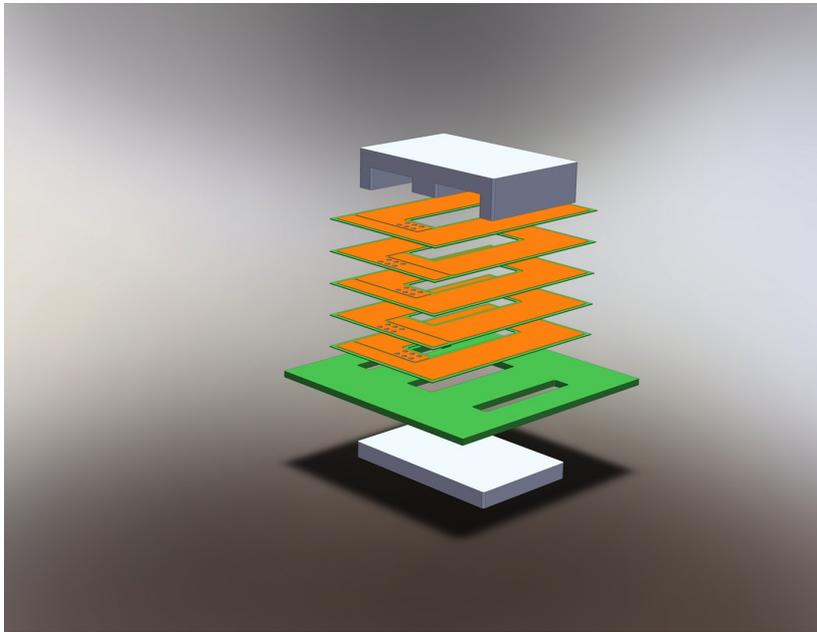


FIGURE 4.25 : Inductance planaire à fort courant

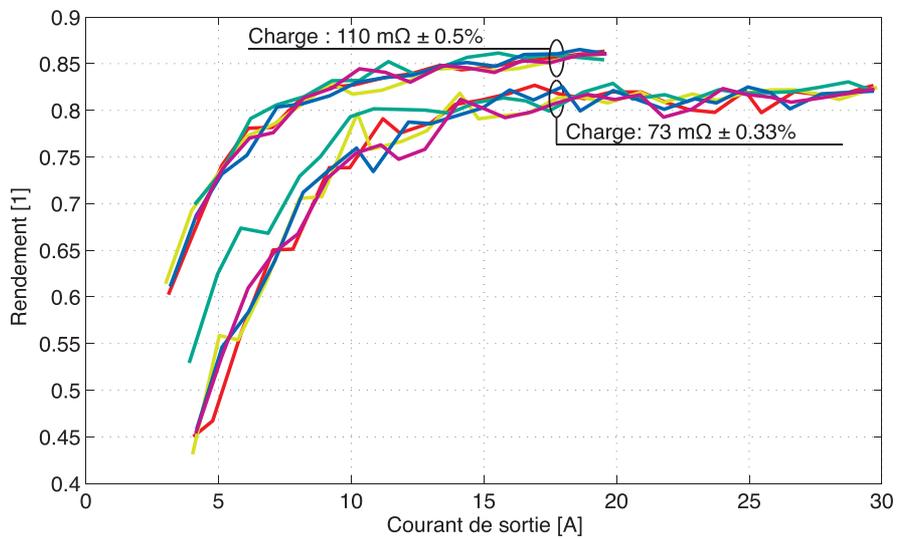


FIGURE 4.26 : Rendement du convertisseur de charge rapide

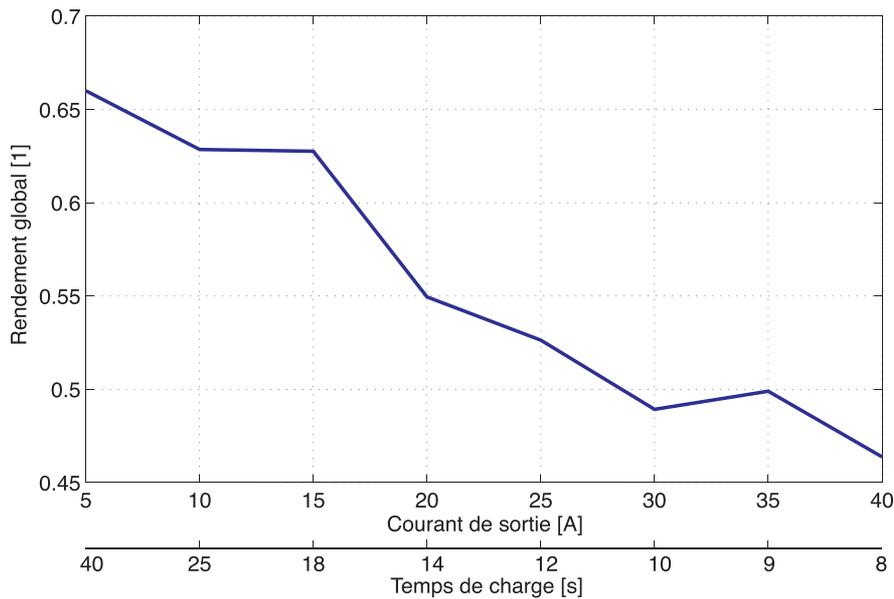


FIGURE 4.27 : Rendement global de la phase de charge rapide

des composants annexes au convertisseur à proprement parler (circuits de mesure, microcontrôleur, etc.) qui n'a pas été prise en compte dans le modèle de pertes.

4.6.3 Charge rapide — rendement global

Au-delà du rendement du convertisseur seul, le rendement de la conversion complète a été évalué sur le prototype de charge rapide décrit au paragraphe précédent. Ainsi, la figure 4.27 présente le rendement de plusieurs phases de charge en fonction du courant de charge. Une comparaison de cette dernière avec celle issue de la simulation du modèle global (figure 4.18) permet de conclure de la manière suivante :

- A faible courant de sortie, le rendement mesuré est beaucoup plus faible que celui qui a été simulé. Une des raisons qui explique ceci est le mauvais comportement du convertisseur de charge rapide à ce point de fonctionnement, tel que décrit ci-avant.
- A fort courant de sortie, malgré l'évaluation correcte des performances du convertisseur, le rendement mesuré montre que son évaluation était optimiste. En guise d'exemple, pour un courant de sortie de $I = 40A$, le rendement est mesuré à hauteur de 47% alors que son estimation visait 53%. Le raisonnement qui justifie l'erreur de rendement pour les faibles courants ne permet pas d'expliquer l'erreur de rendement de charge rapide. Cependant, il est probable que les pertes au niveau des connexions entre les circuits ainsi que les pertes par conduction au niveau du circuit imprimé permettent de justifier, au moins de manière partielle, cet écart. En effet, pour un courant de sortie de $40A$, une résistance parasite de $1m\Omega$ implique des pertes à hauteur de $1W$. En sommant les éventuelles pertes de connexion, la valeur de $5m\Omega$ est rapidement atteinte, qui s'exprime par une baisse de 5% du rendement de la charge rapide (dont la puissance moyenne vaut $120W$), et qui explique aisément l'écart noté entre la mesure et l'évaluation du modèle.

4.7 SYNTHÈSE

Ce chapitre, axé tout d'abord sur l'illustration de l'interconnexion de sources pour former un accumulateur d'énergie hybride, s'est basé sur l'étude de l'alimentation en énergie d'un système mobile. Dans le but de gagner en versatilité, l'introduction a mis en avant des contraintes qui nous ont poussé à évaluer la possibilité de faire usage d'un système de stockage hybride pour remplacer un accumulateur électrochimique de type lithium-ion.

L'examen détaillé des contraintes a permis de définir le type des accumulateurs qui forment le système de stockage hybride. L'un est de type énergie, afin de procurer une autonomie significative, alors que le second est de type puissance, afin de permettre une charge de l'accumulateur hybride extrêmement rapide, mais pas complète.

Les différentes voies de développement et d'implémentation ont été examinées, et des choix ont été proposés. Premièrement, le mode de connexion entre les accumulateurs a été déterminé. L'usage de l'accumulateur de type puissance en tant que filtre de l'accumulateur de type énergie a rapidement été écarté, compte tenu de la faible consommation de puissance de système autonome à alimenter. Ainsi, une connexion *tout ou rien* a été préconisée ; le système puise son énergie dans le supercondensateur (type puissance) d'abord, puis dans l'accumulateur lithium-ion (type énergie) ensuite, comme il en a été question dans la définition de la stratégie.

Le développement s'est ensuite focalisé sur la fonctionnalité de charge rapide de l'accumulateur hybride via la recharge du supercondensateur. Celle-ci est permise par une chaîne d'alimentation dont la topologie a été discutée, où un accumulateur tampon a été introduit, afin de diminuer les contraintes sur la chaîne d'alimentation en énergie du chargeur rapide. Le processus de charge rapide a montré ses implications au sein d'un tel système : puissance de charge élevée, contraintes sur les accumulateurs, les connexions électriques, etc. Une des principales conséquences de la charge rapide est d'empêcher l'accumulateur cible de se voir charger de manière complète, ce qui conduit à un sur-dimensionnement de ce dernier par rapport aux critères de dimensionnement standard.

Afin de permettre un choix motivé des accumulateurs, le dimensionnement de ces derniers a été abordé, avec une importance toute particulière portée sur les accumulateurs supercapacitifs. Il a été montré que le dimensionnement de leur contenu énergétique est fortement dépendant du temps de charge et du rendement énergétique de la charge. Ainsi, un modèle de pertes du système de charge rapide a été proposé, ce qui a permis l'évaluation des pertes au niveau du convertisseur, mais aussi au niveau de tous les éléments de la chaîne de recharge rapide.

En fin de chapitre, le prototype d'accumulateur hybride a été présenté, avec le dimensionnement des composants de stockage, ainsi que des éléments électroniques le composant. Dans un second temps, le prototype de chargeur rapide, destiné à alimenter l'accumulateur hybride a été présenté, puis le rendement mesuré a été confronté aux évaluations obtenues par la simulation du modèle de pertes.

Finalement, le rendement de la charge rapide a été mesuré, en fonction du courant de charge. Cette mesure met en évidence le rendement moyen d'un tel transfert d'énergie, dont la majorité des pertes est dissipée dans les éléments de stockage eux-mêmes. La



FIGURE 4.28 : Prototype de charge rapide et alimentation hybride d'un système audio sans fil

confrontation des résultats expérimentaux aux simulations ont permis de valider le modèle de pertes, ainsi que la faisabilité d'un tel transfert rapide de l'énergie entre deux accumulateurs.

4.7.1 *Prototype final*

Le système présenté tout au long de ce chapitre a fait l'objet d'une collaboration industrielle. Dans ce cadre, une seconde réalisation, sous forme de prototype, a été réalisée. Avec les paramètres présentés lors du dimensionnement, des prototypes de chargeur rapide et d'accumulateur hybride ont été réalisés pour l'alimentation d'un système audio sans fil. La figure 4.28 présente le prototype final remis à l'industriel, qui offre les fonctionnalités de charge rapide ainsi que de système de stockage hybride de l'énergie.

La stratégie a été implémentée telle que présentée sur la chaîne d'alimentation (charge rapide, charge lente, accumulateur hybride). Des tests d'autonomie ont été réalisés sur ce système. Ces derniers ont confirmé les résultats présentés en fin de chapitre; l'autonomie mesurée (29 minutes) correspond au cahier des charges présenté en début du chapitre. L'hybridation de l'accumulateur du système audio sans fil a permis d'offrir une recharge partielle de l'accumulateur, et, par conséquent, la possibilité de faire usage de ce dernier en l'intervalle d'une charge rapide de 10 secondes.

Quatrième partie

ADAPTATION DE PUISSANCE

L'étude des systèmes de stockage hybride a permis de mettre en évidence de multiples raisons pour justifier la mise en place d'un tel système. Bar le biais du cas d'application, la problématique des transferts rapides d'énergie a été abordée ; cette dernière laisse entrevoir des rendements d'accumulateurs peu idéaux, notamment lorsque ces éléments sont fortement sollicités en puissance. Cette section se propose de faire un pas dans le domaine des systèmes intermittents.

GÉNÉRALISATION DE LA RECHARGE RAPIDE

5.1 CONTEXTE

Au cours du chapitre précédent, un accumulateur hybride a été étudié, dimensionné, puis réalisé, afin de permettre la charge rapide d'un système autonome, dont l'alimentation était initialement assurée par un accumulateur électrochimique de type lithium-ion. Une grande partie du développement s'est focalisée sur la charge rapide de l'accumulateur hybride, en mettant en avant les difficultés d'implémentation ainsi que les conséquences d'un transfert rapide d'énergie entre deux accumulateurs sur le dimensionnement de ces derniers.

Lors de cette étude, le choix a été fait de ne pas reporter sur l'alimentation en énergie du chargeur les contraintes en puissance liées à la charge rapide de l'accumulateur. Ainsi, sur la base de cet *a priori*, afin de fournir l'énergie nécessaire à la charge de l'accumulateur hybride, un accumulateur intermédiaire a été introduit au sein de la chaîne d'alimentation. De cette manière, le transfert d'énergie à puissance élevée est uniquement localisé entre les deux accumulateurs, sans contrainte imposée aux autres éléments de la chaîne d'alimentation en énergie.

5.2 OBJECTIFS

Alors que le choix de limiter les contraintes en puissance sur l'alimentation a été réalisé *a priori*, ce chapitre souhaite mettre en évidence la problématique de l'alimentation en énergie d'une charge fortement intermittente, comme l'accumulateur hybride du chapitre précédent lors de la phase de charge. Dans un premier temps, un rappel sur les applications intermittentes sera proposé ; les différentes solutions pour l'alimentation d'une charge intermittente seront proposées et examinées.

Dans un second temps, la solution qui consiste en l'alimentation de la charge par le biais d'un accumulateur intermédiaire sera détaillée. Pour aller plus loin, une amé-

lioration du système sera proposée, avec l'adjonction d'un accumulateur supplémentaire à la chaîne d'alimentation en énergie de la charge intermittente. Le rendement du système sera modélisé, puis des considérations sur le dimensionnement des accumulateurs intermédiaires seront formulées. Tout au long de ce chapitre, les différents systèmes seront représentés à l'aide de l'outil de REM et modélisés.

5.3 ALIMENTATION D'UNE CHARGE INTERMITTENTE

Lors de la classification des systèmes hybrides proposée au chapitre 3, l'intérêt de ce type d'accumulateurs a été mis en évidence pour les charge intermittentes. A titre d'exemple, dans le domaine de la traction ferroviaire, un train hybride [15] démontre le potentiel de sous-dimensionnement en puissance de l'entraînement diesel du véhicule par l'introduction d'un stockage additionnel d'énergie. Ce dernier est permis, d'une part, grâce à la réversibilité du flux d'énergie acquise par l'ajout d'un accumulateur réversible, et d'autre part par l'assistance énergétique offerte par l'accumulateur d'énergie.

D'autres approches [43, 44] proposent des systèmes de stockage qui permettent l'accumulation de l'énergie d'une source photovoltaïque durant la journée afin de permettre son injection sur le réseau triphasé durant la nuit, dans le but de garantir la constance de l'approvisionnement en énergie. Cette approche traite un système qui emmagasine l'énergie provenant d'une source limitée en puissance, afin de découpler les besoins de puissance entre la génération d'énergie issue des cellules photovoltaïques et son injection sur le réseau.

De ces deux exemples, on recense deux éléments communs. Premièrement, la problématique de l'alimentation de charges qui présentent une consommation fortement discontinue est au coeur de ces travaux (train, contribution non continue au réseau électrique). Deuxièmement, l'intérêt d'alimenter les charges depuis une source de faible puissance est mis en avant dans les deux cas. Dans un cadre plus général, on peut mentionner un nombre important d'applications à consommation intermittente telles que la manoeuvre de vannes, barrières, etc. où la puissance consommée est relativement élevée sur une durée extrêmement courte.

5.3.1 Définition de la charge intermittente

Ainsi, on souhaite approfondir, dans un cadre plus général, la problématique de l'alimentation d'une source d'énergie dont la consommation présente un comportement intermittent de type tout-ou-rien, comme présenté en figure 5.1. Selon cette représentation, et de manière analogue à ce qui a été présenté au point 2.5.1.2 (figure 2.6 page 29), les définitions du comportement de la charge sont proposées :

LA PÉRIODE DE FONCTIONNEMENT T_i qui est définie comme l'intervalle temporel entre chaque phase de fonctionnement, où la charge consomme de l'énergie ;

LA DURÉE DE FONCTIONNEMENT t_{on} qui est définie comme l'intervalle temporel durant lequel la charge consomme de l'énergie ;

LE RAPPORT CYCLIQUE DE FONCTIONNEMENT D_{on} défini comme le rapport entre la durée de fonctionnement et la période de fonctionnement. Cette valeur, com-

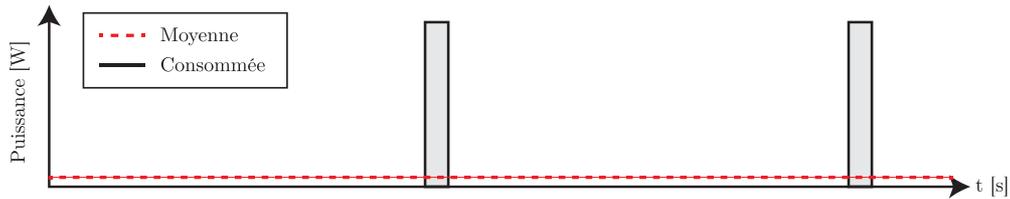


FIGURE 5.1 : Principe de fonctionnement intermittent tout-ou-rien

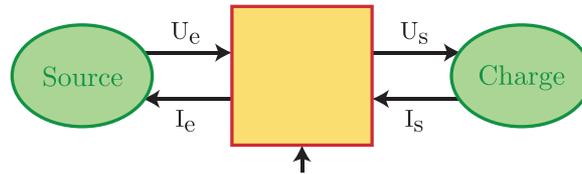


FIGURE 5.2 : Principe de l'alimentation directe

prise entre 0 et 1, est nulle lorsque la durée de fonctionnement est nulle et vaut 1 lorsque la durée de fonctionnement est égale à la période de fonctionnement ;

LA PUISSANCE INSTANTANÉE P_{on} est la puissance consommée par la charge pendant sa durée de fonctionnement ;

LA PUISSANCE MOYENNE $P_m = \langle P_{on} \rangle = P_{on}D_{on}$ est la puissance, qui, rapportée à la période de fonctionnement, représente la même quantité d'énergie que celle consommée par la charge durant la durée de fonctionnement.

5.3.2 Méthodes d'alimentation des charges intermittentes

Les caractéristiques des charges intermittentes étant définies, les lignes suivantes visent à mettre en lumière les diverses façons d'alimenter une charge intermittente, afin de permettre leur comparaison.

5.3.2.1 Alimentation directe

La figure 5.2 présente le principe de l'alimentation directe de la charge intermittente. Dans cette représentation, la source est interfacée à la charge par un élément de conversion qui fait office de commande du flux de puissance.

De manière évidente, et faisant référence aux développements du chapitre 2, les contraintes en puissance instantanée de la charge sont reportées intégralement sur la source, qui doit être capable de les supporter, de manière à ce que la puissance fournie par la source soit égale à celle consommée par la charge à chaque instant. Afin de mettre en évidence le problème lié à ce type d'alimentation, et notamment au sur-dimensionnement de la source, on propose, en respectant la représentation de la figure 5.2, de la modéliser par le biais d'un schéma électrique équivalent, une source de tension U_{in} disposée en série avec une résistance de valeur R_s .

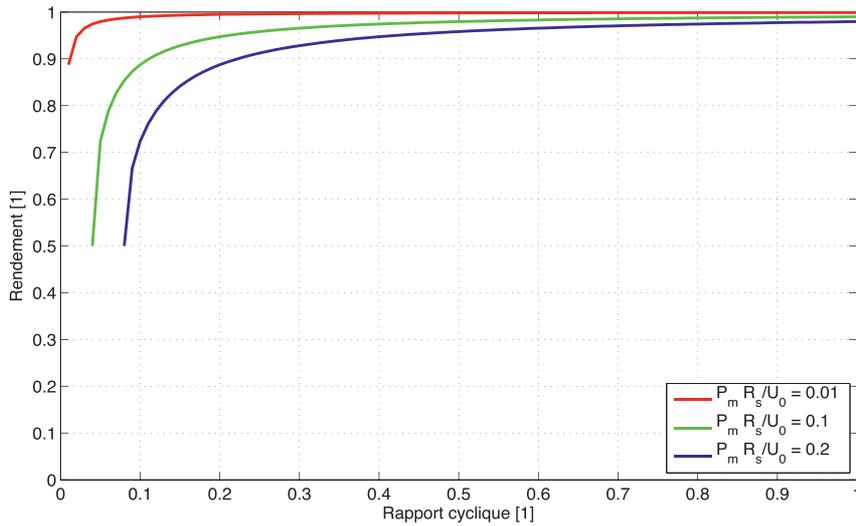


FIGURE 5.3 : Rendement de l'alimentation directe

Ce modèle de source est le même que celui proposé au § 2.6.2 (figure 2.10 page 34), à la différence près que la valeur de la résistance parallèle R_s est considérée comme infinie. Cette simplification se justifie ici dans le sens où le phénomène d'auto-décharge peut être négligé, étant donné que les notions d'énergie stockée et de durée de fonctionnement ne sont liées qu'aux caractéristiques que ce chapitre souhaite mettre en évidence.

Le bloc de conversion est modélisé par un interrupteur idéal et la charge, par une résistance de valeur R_l . Sous ces conditions, il est possible de mettre en évidence le rendement de l'alimentation en fonction du rapport cyclique de fonctionnement. La puissance instantanée est définie, en fonction de la puissance moyenne, par la relation :

$$P_{on} = \frac{P_m}{D_{on}} \tag{5.1}$$

On souhaite mettre en évidence le rendement du transfert énergétique entre ces deux éléments. Pour ce faire, il est possible de se rapporter à l'équation (2.12) en page 37 qui est l'expression générique de l'énergie extractible lors de l'alimentation d'un système intermittent. Une simplification de cette dernière est cependant proposée ici, en faisant fi des termes liés à la modélisation de l'autodécharge. Cette dernière permet de mettre en évidence le rendement de ce mode l'alimentation :

$$\eta = \frac{2P_m R_s}{D_{on} U_0 \left[U_0 - \sqrt{U_0^2 - 4 \frac{P_m R_s}{D_{on}}} \right]} \tag{5.2}$$

Une représentation de ce dernier est donnée en figure 5.3. Pour une puissance moyenne consommée par la charge intermittente, cette dernière met en évidence le rendement en fonction du rapport cyclique de fonctionnement.

Selon cette figure, les commentaires suivants peuvent être formulés :

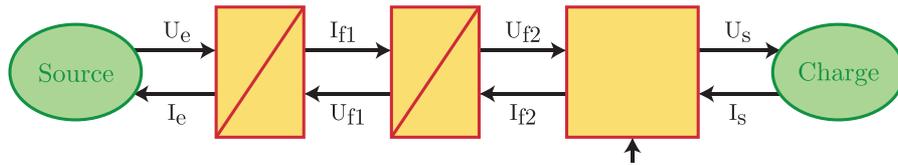


FIGURE 5.4 : Principe de l'alimentation filtrée

- Pour un rapport cyclique de fonctionnement proche de 1, le rendement de l'alimentation, défini par les valeurs de puissance moyenne, tension à vide et résistance série, est proche de l'unité ;
- Pour un rapport cyclique de fonctionnement proche de 0, le rendement de l'alimentation tend vers 0. Le modèle proposé met donc en évidence les pertes au sein de la source ainsi que des conséquences que cela porte sur son rendement. Cette solution n'est donc pas à préconiser pour ce type de systèmes.

5.3.2.2 Filtrage

La figure 5.4 présente le principe de l'alimentation directe de la charge intermittente avec un filtrage. Dans cette représentation, la source est à nouveau interfacée à la charge par un élément de conversion qui fait office de commande du flux de puissance. Par rapport à l'alimentation directe où toute la puissance prélevée par la charge était directement imposée à la source, cette version comporte un filtre passe-bas LC.

L'usage de cette solution implique des conséquences sur le fonctionnement du système sous les hypothèses posées plus haut, notamment celle de la modélisation de la charge. Premièrement, il n'est pas possible de garantir une puissance constante consommée par la charge sans la présence d'un système d'adaptation actif. Le but n'étant ici pas dans le détail du dimensionnement du filtrage, seules quelques considérations génériques sont formulées par rapport à cette solution.

Bien qu'un filtrage de la sollicitation en puissance soit possible, un système passif de filtrage ne permet pas de filtrer la sollicitation de sorte que la source ne soit sollicitée que par la puissance moyenne prélevée par la charge. De plus, la taille des éléments de filtrage (inductance et capacité) sera proportionnelle à la période de fonctionnement, mais aussi à la puissance moyenne.

5.3.2.3 Alimentation par stockage intermédiaire

Une troisième approche consiste à tendre vers le cas idéal où la source ne fournit que la puissance moyenne consommée par la charge (figure 5.1). La solution de filtrage proposée ci-dessus permet une réduction de la contrainte en puissance, et se rapproche donc du stockage intermédiaire, mais sans l'égaliser. En effet, la solution de filtrage ne permet d'égaliser le stockage intermédiaire que lorsque la taille des filtres est infinie. Ainsi, afin de fournir un meilleur découplage entre la puissance fournie par la source et celle consommée par la charge, un accumulateur d'énergie est placé au sein de la chaîne d'alimentation. En plus de celui-ci, un élément de conversion contrôlable est

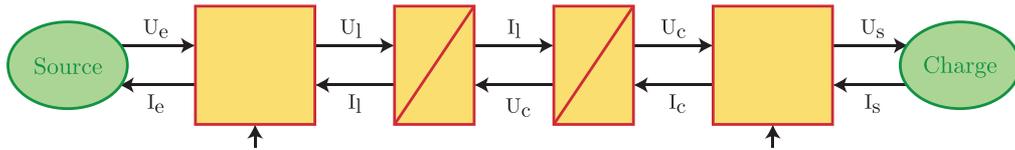


FIGURE 5.5 : Principe de l'alimentation par stockage intermédiaire

introduit entre la source et l'élément d'accumulation. La figure 5.5 présente une REM d'une chaîne d'alimentation par stockage intermédiaire.

Dans cette représentation, on distingue, de droite à gauche :

- La charge, modélisée par une résistance ;
- Un élément de conversion mono-physique modélisé par un interrupteur idéal, lié à l'enclenchement et au déclenchement de la charge ;
- Un élément accumulateur, modélisé par un condensateur et sa résistance série ;
- Un bloc accumulateur et un bloc de conversion mono-physique représentant un convertisseur d'interface dont la commande permet de contrôler la recharge de l'accumulateur.

Comparé à l'alimentation directe abordée au paragraphe 5.3.2.1, ce système présente un intérêt au niveau du rendement de l'alimentation en énergie sous la condition que la résistance série de l'élément accumulateur soit plus faible que celle proposée par l'alimentation décrite plus haut. En effet, bien que cette approche permette de découpler les besoins en puissance de la charge et de la source, ces derniers sont reportés sur l'accumulateur intermédiaire.

Si, dans un but de simplification, on venait à considérer cet accumulateur comme une source de tension similaire à celle de l'alimentation directe (source et résistance série), le rendement énergétique du transfert d'énergie entre l'accumulateur et la charge pourrait être décrit par l'équation (5.2).

5.4 CLASSIFICATION ET SOLUTIONS

Alors que le chapitre 2.5.1 classifiait les charges en fonction de la forme de leur sollicitation en puissance, il est question ici de se focaliser uniquement sur la classification des charges unidirectionnelles intermittentes. Ainsi, en se basant sur les définitions de la partie 5.3, il est possible de distinguer ce type de charges en fonction de deux de leurs caractéristiques :

- Une charge dont le rapport cyclique de fonctionnement est faible (par exemple inférieur ou égal à $D_{on} = 0.1$) sera qualifiée de fortement intermittente, alors que celle dont le rapport cyclique est supérieur à cette valeur sera qualifiée de faiblement intermittente ;
- Une charge dont la période de fonctionnement est grande (par exemple supérieure ou égale à $T_i = 10s$) sera qualifiée de basse fréquence, alors que celle dont la période de fonctionnement est inférieure à cette valeur sera qualifiée de haute fréquence.

	Faiblement intermittentes	Fortement intermittentes
Haute fréquence	Alimentation directe ou filtrage	Filtrage
Basse fréquence	Alimentation directe	Stockage intermédiaire

TABLE 5.1 : Classification des charges intermittentes

Au vu de ces critères, il est possible de classer les charges intermittentes en quatre catégories représentées au tableau 5.1, et, pour chacune d'entre-elles, de proposer des solutions pour leur alimentation. Ainsi, selon les remarques énoncées lors de la présentation des systèmes d'alimentation, on conclut :

- L'alimentation des charges intermittentes à haute fréquence peut être réalisée grâce au filtrage. Dans cette configuration, la taille des filtres n'est pas rédhibitoire et leur usage permet de réduire les contraintes en puissance sur la source d'énergie ;
- L'alimentation des charges faiblement intermittentes peut être réalisée par alimentation directe. En effet, il a été démontré que le rendement d'une telle alimentation n'était que faiblement impacté par les charges faiblement intermittentes ;
- Seules les charges réunissant les caractéristiques d'une intermittence forte et faible fréquence sont candidates à l'alimentation par stockage intermédiaire. L'alimentation directe est exclue par le faible rendement qu'elle propose, et un filtrage paraît improbable dans le sens où la taille des éléments de filtrage serait trop importante au vu des constantes de temps en jeu.

5.5 ALIMENTATION PAR STOCKAGE INTERMÉDIAIRE

Alors que l'introduction à l'alimentation par stockage intermédiaire a été abordée au paragraphe 5.3.2.3 et l'usage d'une telle approche dans le cadre de l'alimentation des charges fortement intermittentes à basse fréquence a été justifiée, la suite de ce chapitre s'attardera sur l'étude détaillée de l'alimentation par stockage intermédiaire.

5.5.1 Définitions et hypothèses de travail

Dans le cadre particulier de cette étude d'alimentation par stockage intermédiaire, l'intérêt se portera sur l'étude de la chaîne d'alimentation en énergie d'une charge intermittente qui puise son énergie dans une source dont la puissance est limitée. Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- La source d'énergie qui alimente le système fournit une puissance continue P_{in} ;
- La charge qui doit être alimentée est définie par les propriétés décrites au point 5.3 ;
- La source d'énergie est considérée comme idéale ;
- Les charges et décharges des accumulateurs sont réalisées à puissance constante.

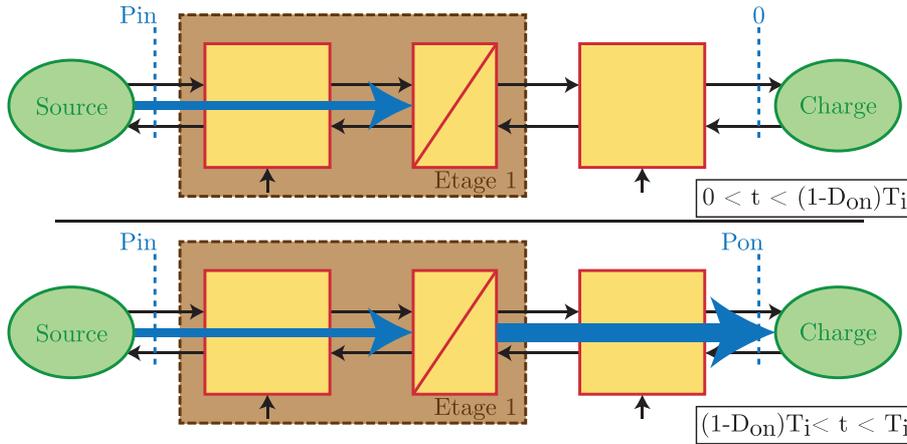


FIGURE 5.6 : Fonctionnement de l'alimentation par stockage intermédiaire mono-étagé

5.5.2 Système mono-étagé

Le système le plus simple d'alimentation par stockage intermédiaire d'énergie est le cas où il y a la présence d'un unique accumulateur. La figure 5.6 met en avant une représentation d'un tel système, avec la mise en évidence des flux de puissance durant ses deux phases de fonctionnement :

1. Durant la période où la charge est déclenchée, le flux de puissance issu de la source vaut P_{in} et charge l'accumulateur qui fait partie de l'étage de stockage intermédiaire.
2. Durant la période où la charge est enclenchée, cette dernière consomme de la puissance P_{on} , alors que le flux de puissance issu de la source vaut toujours P_{in} . Dans ce cas, la puissance consommée par la charge peut être divisée en deux contributions. La première est une contribution directe de la source ; selon les hypothèses formulées, cette contribution est insuffisante afin d'assurer l'alimentation de la charge directement par la source. Le complément provient de la décharge de l'accumulateur de l'étage de stockage intermédiaire.

La quantité d'énergie stockée par l'accumulateur croît durant la première phase et décroît durant la seconde partie. Il est évident que pour éviter une modification de l'état de charge moyen de l'accumulateur, l'énergie injectée dans ce dernier doit être strictement égale à celle qui est prélevée durant la période de fonctionnement t_i . Ainsi, dans le cas idéal où le système présente un rendement unitaire, on peut écrire :

$$W_{acCh} = T_i (1 - D_{on}) P_{in} = W_{acDis} = T_i D_{on} (P_{on} - P_{in}) \quad (5.3)$$

5.5.2.1 Modèle de pertes

Afin de pouvoir étudier le système d'un point de vue plus réaliste, on propose un modèle de pertes, afin de pouvoir estimer le rendement de l'alimentation de la charge intermittente. Les propositions sont les suivantes :

- L'accumulateur présente un rendement moyen sur la période de fonctionnement η_{ac} . Le rendement de l'accumulateur décroît avec le rapport cyclique d'enclenchement ; de cette manière, la sollicitation plus intense de l'accumulateur pour de faibles temps d'enclenchement (de décharge) est modélisée. On ne tient pas compte du phénomène d'auto-décharge. Ainsi, via le paramètre κ_a qui modélise les pertes de l'accumulateur, on définit le rendement :

$$\eta_{ac} = 1 - \frac{\kappa_a}{D_{on}} \quad (5.4)$$

- La seconde source de pertes sont les éléments de conversion d'énergie. On divise les pertes de ces éléments en deux catégories : celles qui sont dépendantes du flux de puissance au même titre que les pertes d'accumulateur définies ci-dessus, et les pertes liées au fonctionnement à proprement parler des dispositifs de conversion, qui ne dépendent pas de la puissance qui les traversent. Soit P_c la puissance vue à l'entrée d'un système de conversion, on définit les pertes au sein de ce système comme :

$$P_{Lconv} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_{conv} = 0 \\ \kappa_c P_c + P_{Lc0} & \text{autrement} \end{cases} \quad (5.5)$$

- La source, qui est sollicitée par une puissance constante, mais faible, propose un rendement unitaire ;
- L'élément qui contrôle l'enclenchement de la charge (figure 5.6) est à rendement unitaire.

5.5.2.2 Analyse énergétique

On peut déterminer l'énergie qui est extraite de l'accumulateur durant la phase où la charge est enclenchée, ainsi que l'énergie est stockée durant la phase où la charge est déclenchée :

$$W_{acDis} = D_{on} T_i (P_{on} - (P_{in} - P_{Lc0}) (1 - \kappa_c)) \left(1 + \frac{\kappa_a}{D_{on}}\right) \quad (5.6)$$

$$W_{acCh} = (1 - D_{on}) T_i (P_{in} - P_{Lc0}) (1 - \kappa_c) \left(1 - \frac{\kappa_a}{D_{on}}\right) \quad (5.7)$$

La relation qui lie la puissance que doit fournir la source à celle consommée par la charge est obtenue par l'égalité des deux relations précédentes :

$$P_{in} = \frac{D_{on} P_{on} \left(1 + \frac{\kappa_a}{D_{on}}\right)}{(1 - \kappa_c) \left(1 + \frac{\kappa_a}{D_{on}} (2D_{on} - 1)\right)} + P_{Lc0} \quad (5.8)$$

Il est à noter que cette dernière ne dépend pas de la période. La figure 5.7 présente le rendement de l'amplification de puissance, qui est défini par la relation :

$$\eta_{a1} = \frac{P_{on} D_{on}}{P_{in}} = \left(\frac{\left(1 + \frac{\kappa_a}{D_{on}}\right)}{(1 - \kappa_c) \left(1 + \frac{\kappa_a}{D_{on}} (2D_{on} - 1)\right)} + \frac{P_{Lc0}}{D_{on} P_{on}} \right)^{-1} \quad (5.9)$$

Sur cette dernière, à puissance consommée P_{on} constante, on commente l'évolution du rendement en fonction du rapport cyclique en faisant varier chacune des sources de pertes :

- Le rendement de l'accumulateur de l'étage intermédiaire est le critère prépondérant, comme on le remarque sur la première figure. De manière générale, plus le rapport cyclique d'enclenchement D_{on} est faible, plus la quantité d'énergie transite par l'accumulateur est importante. Ainsi, un accumulateur à faible rendement aura un impact négatif sur le rendement du système complet, notamment pour des rapports cycliques faibles. Le corollaire à ceci est que pour des rapports cycliques élevés (proche de 1) peu d'énergie doit être stockée, donc le rendement de l'accumulateur a une moindre influence sur le rendement global ;
- Sur la seconde représentation, on examine l'impact du coefficient de rendement κ_c (pertes du système de conversion de l'étage qui sont proportionnelles à la puissance qui le traverse) sur celui du système total. Etant donné que la puissance qui traverse l'étage de conversion est constante durant tout le cycle, les pertes convertisseur ($\kappa_c P_c$) sont uniquement fonction de la puissance d'entrée, et ne dépendent donc pas directement du rapport cyclique du système. Cependant, plus le rendement de l'étage d'accumulation est mauvais, plus la source d'entrée doit fournir de l'énergie afin de compenser ces pertes. Si la source doit fournir une puissance plus importante, les pertes au niveau de l'étage de conversion seront, elles aussi, plus nombreuses ;
- Sur la troisième représentation de la figure 5.7, on s'intéresse aux pertes de fonctionnement du convertisseur de l'étage intermédiaire P_{Lc} qui ne dépendent pas de la puissance qui traverse ce dernier. De par leur définition, les pertes de fonctionnement du convertisseur sont proportionnelles à la durée d'enclenchement de ce dernier. Or dans le cas du système mono-étagé, le convertisseur est constamment actif, et les pertes de fonctionnement de ce dernier sont donc fixes ; elles ne dépendent ni du rapport cyclique du système, ni de l'énergie transférée par cycle. Ainsi, si la puissance consommée par le convertisseur est proche de la puissance de sortie, on remarque que le rendement de cycle est fortement réduit.

Le comportement du système mono-étagé d'alimentation intermédiaire peut être résumé en figure 5.8, qui présente le rendement en fonction du rapport cyclique et de coefficient de pertes de l'accumulateur. Cette dernière insiste sur le fait que la nécessité d'un accumulateur à bon rendement est primordiale dans ce genre de système.

A la lecture de certains commentaires, un inconvénient de l'alimentation est mis en évidence. En effet, dans le cas où le système de conversion présente, de par sa nature, une consommation d'énergie nécessaire à son fonctionnement (P_{Lc}) importante par rapport à celle fournie par la source, le rendement du cycle de fonctionnement est mauvais. Deux solutions existent pour pallier à ce problème : remplacer le système de conversion par une alternative dont la consommation d'énergie est plus faible, ou proposer un moyen qui permette de réduire la durée de fonctionnement du convertisseur incriminé (et d'augmenter la puissance qui le traverse) .

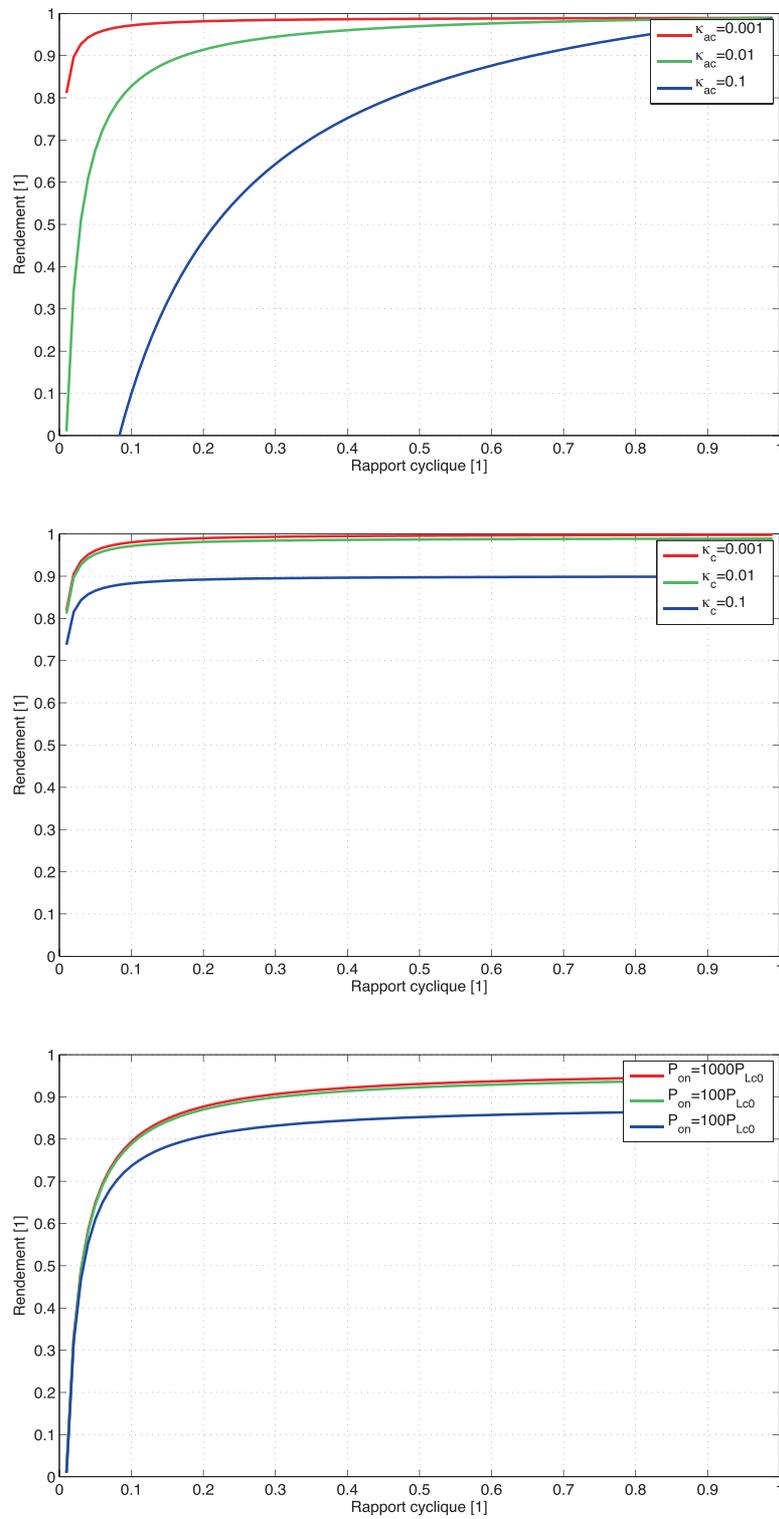


FIGURE 5.7 : Rendement de l'alimentation par stockage intermédiaire

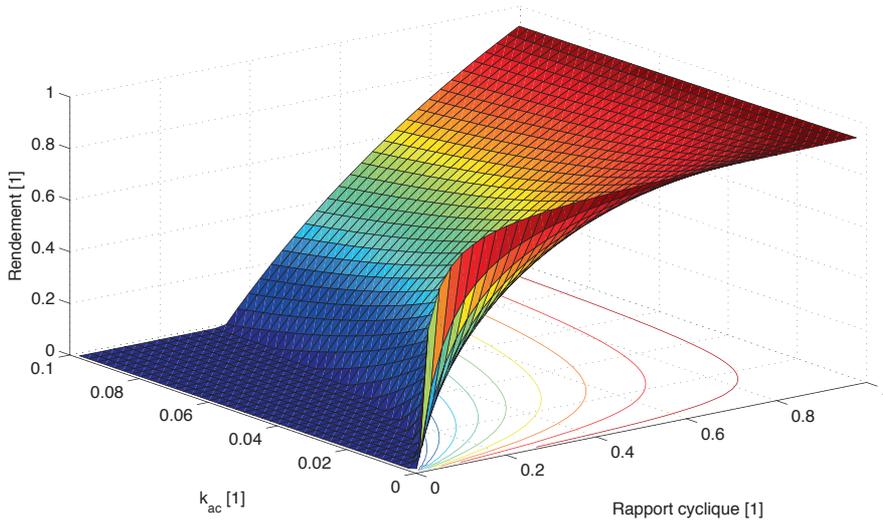


FIGURE 5.8 : Représentation du rendement de l'alimentation mono-étagée

5.5.3 Système bi-étagé

Dans le sens de la seconde proposition énoncée ci-avant, on propose d'étudier une variante du système d'alimentation intermédiaire. La figure 5.9 montre une représentation du système. Ce dernier est composé d'un système mono-étagé, auquel a été inséré un étage intermédiaire supplémentaire de stockage d'énergie directement après la source.

L'intérêt de la présence d'un second étage de stockage se situe dans le fait que ce dernier autorise le fonctionnement intermittent du convertisseur du système mono-étagé, suivant la recommandation issue des conclusions précédentes. Dans ce cas, il est possible de distinguer trois phases de fonctionnement, représentées en figure 5.10 :

- I. L'état initial est défini par le fait que l'accumulateur de chaque étage de stockage soit déchargé. La source fournit de l'énergie à l'étage A par le biais de son convertisseur ; l'accumulateur de l'étage A se charge. La puissance fournie par la source vaut P_{in} , alors que la puissance fournie par l'étage A à l'étage B est nulle, tout comme la puissance fournie à la charge.
- II. Une fois l'accumulateur de l'étage A chargé, la seconde phase débute. Durant celle-ci, la source continue à fournir de l'énergie à l'étage A à hauteur de P_{in} , alors qu'un transfert d'énergie prend place entre l'étage A et B. L'accumulateur de l'étage A se décharge, alors que celui de l'étage B se charge. De l'énergie qui est fournie à l'accumulateur de l'étage B, on distingue deux contributions en puissance : la première provient directement de la source, à hauteur de P_{in} , alors que la seconde est issue de la décharge de l'accumulateur de l'étage A. La somme de ces deux flux de puissance est notée P_A . Une fois que l'accumulateur A est vide, cette phase prend fin, et la phase précédente reprend ; l'accumulateur A se recharge à nouveau via la source. L'alternance des phases I et II se répète tant que l'accumulateur de l'étage B n'est pas complètement chargé.

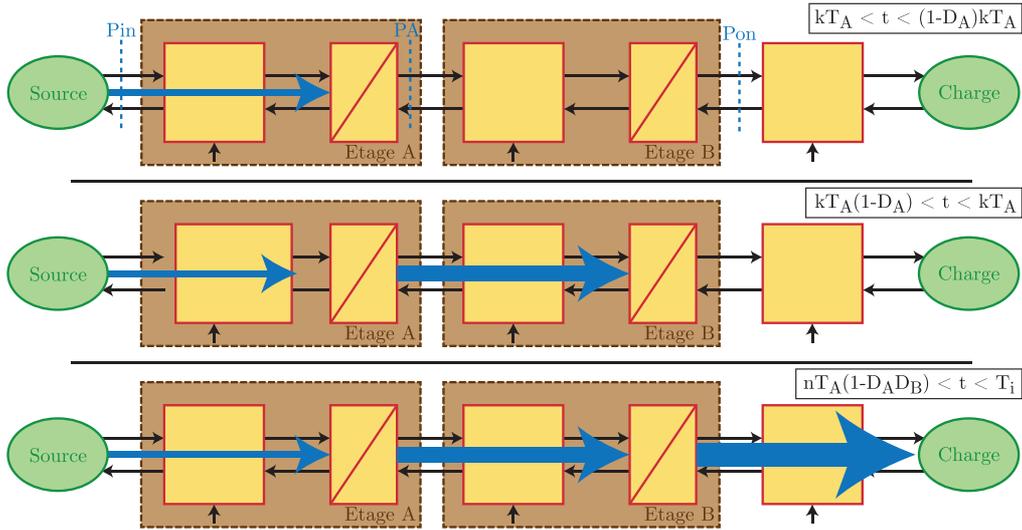


FIGURE 5.9 : Fonctionnement de l'alimentation par stockage intermédiaire bi-étagé

- III. Une fois l'accumulateur de l'étage B chargé, la phase II est interrompue par l'enclenchement de la charge. Ainsi, à ce moment, l'accumulateur de l'étage B se décharge et l'application consomme une puissance P_{on} . De la puissance consommée par l'application, on distingue trois flux, par ordre d'importance : la contribution directe de l'étage B par la décharge de son accumulateur, la contribution de l'étage A par la décharge de son accumulateur, ainsi que la contribution de la source, à hauteur de P_{in} . La source fournit toujours P_{in} et le transfert d'énergie entre l'étage A et B a lieu à hauteur de P_A . A la fin de la période de fonctionnement T_i , la phase I reprend son cours.

Une similitude avec le système mono-étagé est à noter. En effet, l'alternance des phases I et II est exactement similaire au mode de fonctionnement du système précédent. Ainsi, dans le but d'apparenter les deux systèmes, on définit la période de fonctionnement du premier étage T_A et le rapport cyclique d'enclenchement du premier étage D_A , comme représenté en figure 5.10. Afin de conserver un synchronisme dans le fonctionnement des étages A et B, l'hypothèse est posée que la période de fonctionnement de l'étage A est un sous-multiple entier de la période de fonctionnement du système. Cette condition est nécessaire afin d'assurer que le fonctionnement du système durant la phase III soit tel qu'il a été décrit ci-dessus (contribution simultanée des deux étages et de la source lors de la décharge). Ainsi :

$$T_i = nT_A \quad (5.10)$$

De même, il est possible de définir la période de l'étage B t_B , qui est définie par la somme des instants durant lesquels l'étage B est actif, c'est-à-dire que la puissance à ses bornes n'est pas nulle. Ainsi, il vient :

$$T_B = nT_A D_A \quad (5.11)$$

Le second paramètre de l'étage B, son rapport cyclique D_B , est défini de la manière suivante :

$$D_B = \frac{t_{on}}{T_B} \quad (5.12)$$

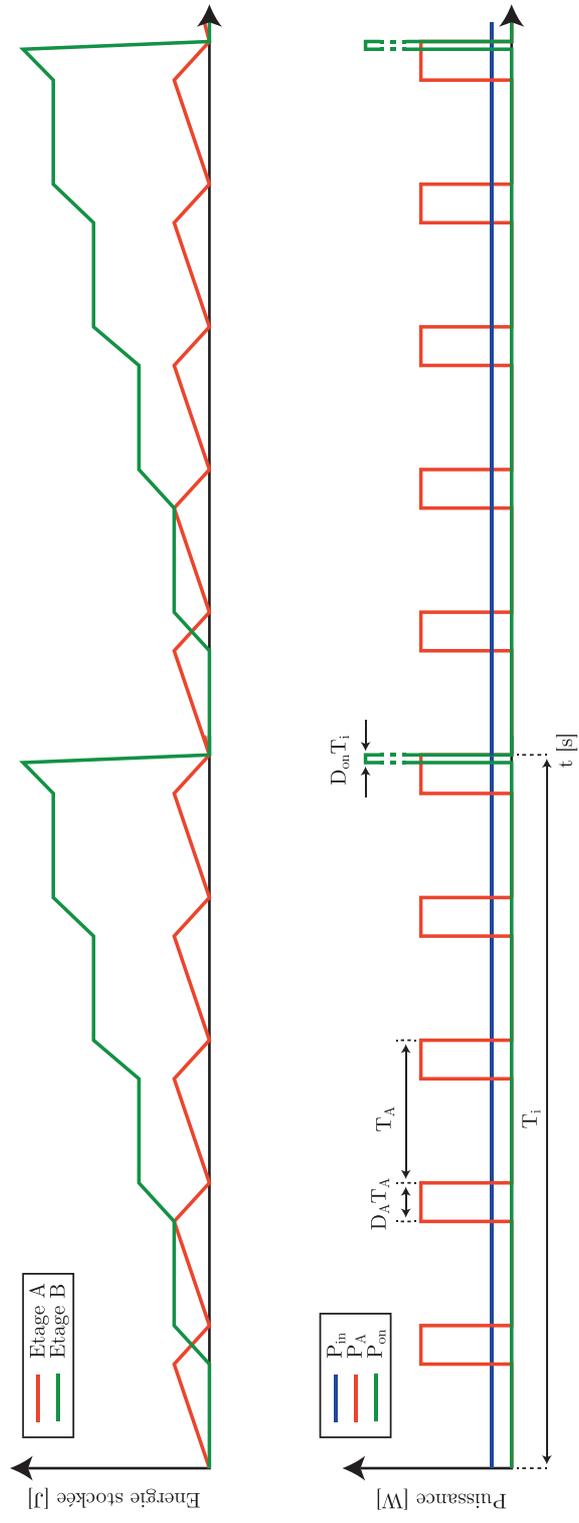


FIGURE 5.10 : Phases de fonctionnement de l'alimentation par stockage intermédiaire bi-étagé

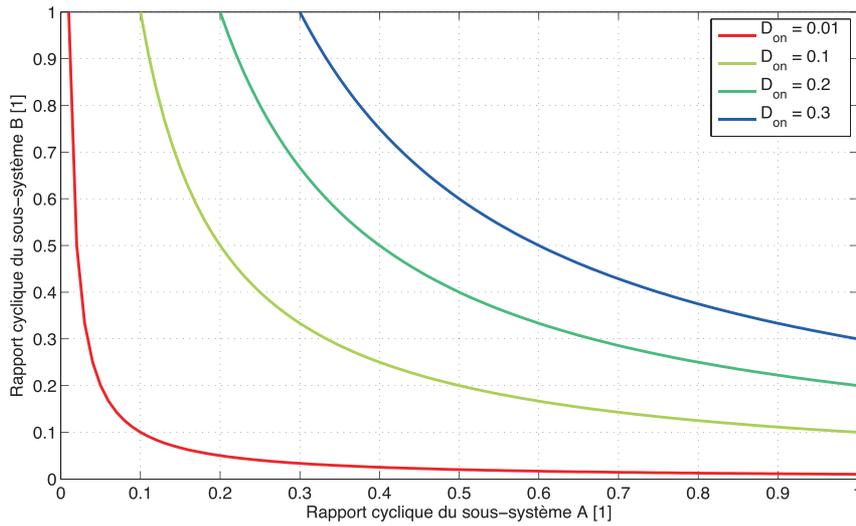


FIGURE 5.11 : Relation entre les rapports cycliques de chaque sous-système

Par ces différentes définitions, on met en évidence en figure 5.11 l'association des rapports cycliques des deux étages de stockage pour définir le rapport cyclique de fonctionnement, similaire à celui du système mono-étagé :

$$D_{on} = D_A D_B \quad (5.13)$$

En tenant compte de ces définitions, et en accord avec la figure 5.10, une condition doit être posée afin d'assurer un fonctionnement conforme aux hypothèses. En effet, il est nécessaire que le temps durant lequel le système bi-étagé fournit de l'énergie à la charge soit inférieur ou égal à la période durant laquelle le sous-système A transfère de l'énergie au sous-système B. Ainsi, la condition qui garantit ce fonctionnement est :

$$D_A D_B T_i \leq D_A T_A \quad (5.14)$$

$$n D_B \leq 1 \quad \text{avec } T_i = n T_A \quad (5.15)$$

5.5.3.1 Modèle de pertes

Les hypothèses et définitions du modèle de pertes établis au paragraphe 5.5.2.1 pour le cas du système mono-étagé sont reprises. On distinguera par contre les contributions en pertes des deux étages par des indices *A* et *B* se référant aux sous-systèmes. A l'image du système mono-étagé, le rendement de l'accumulateur est, ici aussi, dépendant du rapport cyclique de chaque sous-système. Ainsi, les relations suivantes se basent sur l'équation (5.4) :

$$\eta_{acA} = 1 - \frac{\kappa_{aA}}{D_A} \quad (5.16)$$

$$\eta_{acB} = 1 - \frac{\kappa_{aB}}{D_B} \quad (5.17)$$

5.5.3.2 Analyse énergétique

Etant donné que le comportement de l'étage A présente de nombreuses similitudes avec le cas du système mono-étagé, il est possible de se rapporter aux relations (5.6), (5.7) et (5.8) pour la définition du système. Ainsi, durant la phase II, la puissance échangée entre les étages A et B est définie par :

$$P_A = \frac{(P_{in} - P_{Lc0A}) \left(1 + \frac{\kappa_{aA}}{D_A} (2D_A - 1)\right) (1 - \kappa_{cA})}{D_A \left(1 + \frac{\kappa_{aA}}{D_A}\right)} \quad (5.18)$$

Si le fonctionnement du second étage en est réduit à être considéré seulement pendant son temps de fonctionnement défini par sa période de fonctionnement T_B , il est possible de considérer le couple étage B/charge comme un système mono-étagé défini au § 5.5.2. En effet, si la phase I n'est pas considérée, cela revient à identifier l'étage B et la charge comme un système mono-étagé, dont la période de fonctionnement est T_B et dont la puissance d'entrée, continue, vaut P_A ; il est alors aisé d'exprimer la puissance de sortie :

$$\begin{aligned} P_{on} &= \frac{(P_A - P_{Lc0B}) (1 + \kappa_{aB} (2D_B - 1)) (1 - \kappa_{cB})}{D_B (1 + \kappa_{aB})} \\ &= \left[\frac{(P_{in} - P_{Lc0A}) \left(1 + \frac{\kappa_{aA}}{D_A} (2D_A - 1)\right) (1 - \kappa_{cA})}{D_A \left(1 + \frac{\kappa_{aA}}{D_A}\right)} - P_{Lc0B} \right] \\ &\quad \cdot \frac{\left(1 + \frac{\kappa_{aB}}{D_B} (2D_B - 1)\right) (1 - \kappa_{cB})}{D_B \left(1 + \frac{\kappa_{aB}}{D_B}\right)} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Le rendement du système, défini sur la base de l'équation (5.19), peut être calculé. Cette expression est obtenue directement par la mise en évidence de ces termes dans (5.19) :

$$\eta_{a2} = \frac{D_{on} P_{on}}{P_{in}} \quad (5.20)$$

Une représentation du rendement du système bi-étagé¹ est exposée en figure 5.12. Cette dernière lie le rendement du système au rapport cyclique de fonctionnement de l'un des sous-systèmes, en fonction de plusieurs rapports de fonctionnement D_{on} .

Pour chacun des 3 cas représentés, la valeur minimale du rapport cyclique de fonctionnement du sous-système A ne peut pas être inférieure au rapport cyclique de fonctionnement. Ainsi, les points les plus à gauche des courbes présentent le cas de fonctionnement où toute l'amplification de puissance est réalisée par le sous-système A. Dans ce cas, le sous-système B ne fonctionne que peu longtemps et, selon l'équation (5.15), le nombre d'enclenchements successifs n de l'étage A est faible. A l'inverse, lorsque le rapport cyclique du sous-système A est proche de l'unité, ce dernier ne stocke que peu d'énergie, et toute l'amplification de puissance est réalisée par l'étage B.

La figure 5.13 met en évidence le rendement du système² en fonction des pertes du convertisseur de l'étage B. Sur cette dernière, il est aisé de mettre en évidence l'impact qu'ont sur le rendement les pertes du convertisseur de l'étage B. Plus le rapport

1. Paramètres : $\kappa_{cA} = 0.1\%$, $\kappa_{cB} = \kappa_{aA} = \kappa_{aB} = 1\%$, $P_{Lc0A} = 1W$, $P_{Lc0B} = 10W$, $P_m = 100W$
 2. Paramètres : $\kappa_{cA} = \kappa_{cB} = \kappa_{aA} = \kappa_{aB} = 0.1\%$, $P_{Lc0A} = 1W$, $P_m = 100W$

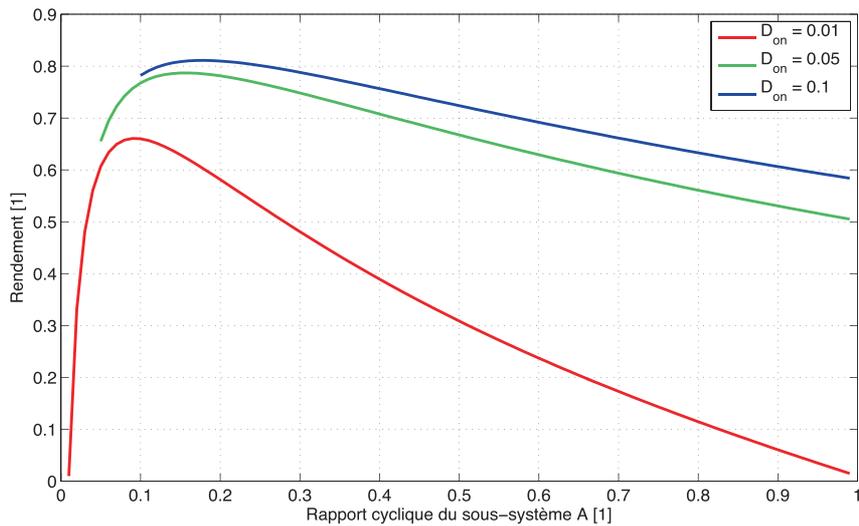


FIGURE 5.12 : Rendement de l'alimentation bi-étagée

cyclique du sous-système A est grand (corollaire : plus celui du sous-système B est faible), plus la durée de fonctionnement de l'étage B est importante. En effet, celle-ci a été identifiée comme proportionnelle à D_A lors de la définition du système (figure 5.10). Une partie des pertes du convertisseur étant liées à la durée de fonctionnement de l'étage B, le mauvais rendement du système est donc justifié par cette raison pour cette configuration. A l'opposé, lorsque le rapport cyclique de l'étage A est faible et celui de l'étage B grand, un faible rendement est mis en évidence. Celui-ci est justifié par les pertes importantes localisées au niveau des accumulateurs dues à la forte sollicitation en puissance. Le paragraphe 5.5.2.1 a expliqué la justification d'une telle modélisation.

Entre ces deux extrêmes, l'optimum de rendement peut être mis en évidence en fonction des paramètres proposés. Ce dernier est l'expression d'une juste répartition de l'amplification de puissance entre les deux étages. Exprimé de manière simple, ce point représente le compromis entre une sollicitation trop intense des accumulateurs d'énergie et un fonctionnement trop long de l'étage B qui entraîne quantité de pertes au niveau de son convertisseur notamment.

5.6 DIMENSIONNEMENT DES ACCUMULATEURS

Alors que les développements précédents se sont focalisés sur la description des systèmes d'alimentation par stockage intermédiaire ainsi que sur l'évaluation du rendement que présentent ces derniers, à aucun moment il n'a été question du dimensionnement des accumulateurs. Ce paragraphe formulera des considérations sur le dimensionnement des accumulateurs de chaque étage de ces systèmes.

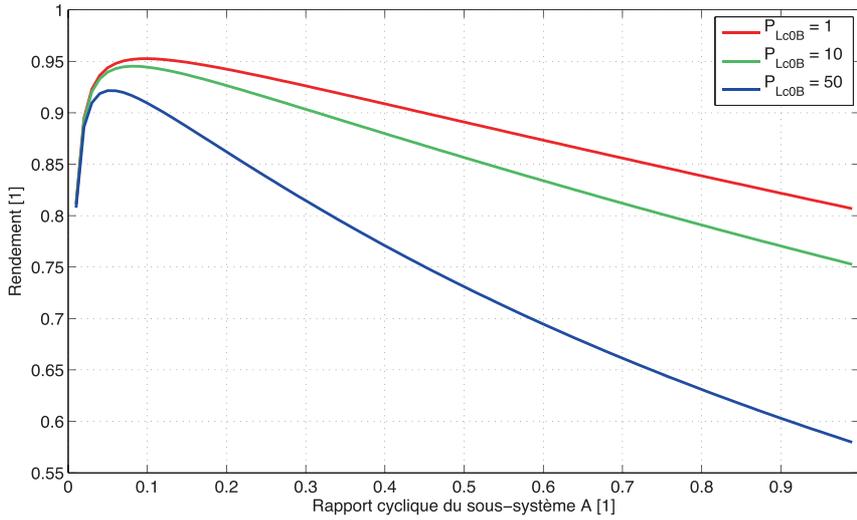


FIGURE 5.13 : Rendement de l'alimentation pour $D_{on} = 0.01$ - pertes convertisseur

5.6.1 Système mono-étagé

Le dimensionnement de l'accumulateur unique d'un système mono-étagé (décrit au § 5.5.2) se révèle être relativement simple. En effet, si, dans une première approche, le système est considéré comme étant à rendement unitaire, la définition du fonctionnement est suffisante pour déterminer la quantité d'énergie qui doit être stockée. Ainsi, dans ce cas idéal, l'adaptation des besoins en puissance de l'application à la puissance constante fournie par la source font que l'énergie stockée dans l'accumulateur est définie par :

$$W_0 = D_{on} T_i (P_{on} - P_{in}) \tag{5.21}$$

Pour aller plus loin dans le dimensionnement de l'étage d'accumulation, il est nécessaire de prendre en compte le rendement qui a été introduit par l'équation (5.9). Issue de l'équation (5.6), l'énergie qui doit être stockée par l'accumulateur vaut :

$$W_{a0} = D_{on} T_i (P_{on} - (P_{in} - P_{Lc0}) (1 - \kappa_c)) \left(1 + \frac{\kappa_a}{D_{on}} \right) \tag{5.22}$$

Cette expression tient compte des différents rendements au sein de la chaîne d'alimentation, notamment du convertisseur, mais aussi de l'accumulateur. Quelques commentaires sur cette expression du rendement sont relevés :

- Au contraire du rendement du système qui ne dépend pas de la période du système, l'énergie qui doit être stockée est évidemment proportionnelle à la période.
- Plus l'écart entre la puissance consommée par la charge et celle fournie par la source est grand, plus la quantité d'énergie stockée est importante.
- A puissance prélevée par la charge constante, plus le rapport cyclique de fonctionnement est faible, plus la quantité d'énergie à stocker est faible. Cela paraît évident dans le sens où l'énergie consommée par la charge décroît avec D_{on} .

- Etant donné que l'intérêt est porté sur l'énergie qui doit être stockée, le rendement d'extraction de l'accumulateur (défini par le biais de par κ_a) a une influence directe sur la quantité d'énergie à stocker.

5.6.2 Système bi-étagé

Dans le cas du système bi-étagé (§ 5.5.3), le dimensionnement du stockage concerne deux accumulateurs d'énergie. La même démarche va être appliquée ici. Tout d'abord, il s'agit de s'intéresser au cas idéal où le rendement du système est unitaire. Sous cette hypothèse, le dimensionnement de l'accumulateur de l'étage B (figure 5.9) est obtenu d'une manière analogue au cas précédent :

$$W_{0B} = D_{on}T_i(P_{on} - P_A) \quad (5.23)$$

Cette dernière est exprimée en fonction de la puissance échangée entre les deux étages de stockage P_A . Ainsi, l'énergie accumulée au sein de l'étage A se formule de la même manière :

$$W_{0A} = \frac{D_A T_i}{n} (P_A - P_{in}) \quad (5.24)$$

En combinant les deux équations précédentes, il vient la condition qui lie le dimensionnement de chacun des accumulateurs :

$$W_{0B} = D_{on}T_i \left(P_{on} - \frac{nW_{accA}}{D_A T_i} - P_{in} \right) \quad (5.25)$$

Cette dernière expression permet de mettre en évidence les nombreux degrés de liberté d'un tel système. Ainsi, même si P_{in} , P_{on} , T_i , D_{on} sont définis par l'application, 3 paramètres influencent le dimensionnement de l'énergie stockée au sein de l'étage B :

- n , soit le nombre de cycles de fonctionnement du sous-système A durant une période de fonctionnement. A rapport cyclique D_a et énergie stockée dans le sous-système B fixés, plus n est grand, plus W_{0A} peut être faible.
- W_{0A} , la quantité d'énergie stockée au sein du sous-système A. Plus cette dernière est élevée, plus la contribution en puissance de l'étage A est importante lors de l'alimentation de la charge. Ainsi, la quantité d'énergie stockée en B est plus faible.
- D_A , le rapport cyclique de fonctionnement de l'étage A. Plus la valeur de ce dernier est élevée, plus la contribution en puissance de l'étage A lors du fonctionnement est faible, et plus la contribution de l'étage B doit être importante. Le corollaire à cela est que le rapport cyclique de fonctionnement de l'étage B s'en retrouve diminué.

De manière analogue à ce qui a été fait pour le système mono-étagé, le dimensionnement des accumulateurs est aussi évalué en tenant compte des sources de pertes du système. Ainsi, il vient :

$$W_{0B} = D_{on}T_i (P_{on} - (P_A - P_{Lc0B}) (1 - \kappa_{cB})) \left(1 + \frac{\kappa_{aB}}{D_B} \right) \quad (5.26)$$

$$W_{0A} = \frac{D_A T_i}{n} (P_A - (P_{in} - P_{Lc0A}) (1 - \kappa_{cA})) \left(1 + \frac{\kappa_{aA}}{D_A} \right) \quad (5.27)$$

Il est à nouveau possible de combiner ces expressions afin de déterminer l'expression qui lie le dimensionnement des accumulateurs dans le cas où les différentes sources de pertes sont prises en compte. Ainsi, la mise en évidence de P_A dans (5.27) et sa substitution dans (5.26) permet d'obtenir l'expression clé du dimensionnement des accumulateurs du système bi-étagé. Cette dernière n'est pas représentée ici pour des raisons de place :

$$W_{0B} = D_{on} T_i \left(1 + \frac{\kappa_{aB}}{D_B} \right) \cdot \left(P_{on} - \left(\frac{nW_A}{T_i (D_A + k_{cA})} + (P_{in} - P_{Lc0A}) (1 - \kappa_{cA}) - P_{Lc0B} \right) (1 - \kappa_{cB}) \right) \quad (5.28)$$

Au vu de la complexité de cette dernière, il est difficile de formuler de commentaires généraux sur le dimensionnement du système bi-étagé. A titre d'illustration du principe de système à stockage intermédiaire bi-étagé et de son dimensionnement, le chapitre suivant traitera un cas d'application particulier.

5.7 SYNTHÈSE

En faisant référence à la recharge rapide abordée au chapitre 4, ce chapitre a introduit la problématique de l'alimentation des systèmes fortement intermittents. Sur la base des développements du chapitre 2, le mauvais rendement de l'alimentation directe d'une charge intermittente a été mise en évidence. Suite à cela, des méthodes alternatives d'alimentation de ce type de systèmes ont été abordées (filtrage et alimentation par stockage intermédiaire).

Afin de pouvoir évaluer l'intérêt de chaque solution pour l'alimentation de systèmes intermittents, ces derniers ont été classés en fonction de deux critères : rapport cyclique de fonctionnement et fréquence de l'intermittence. Par ce biais, il a été mis en évidence que les systèmes à rapport cyclique faible et de fréquence basse sont candidats à l'alimentation par stockage intermédiaire.

Le fonctionnement d'un système générique de stockage intermédiaire a été ensuite abordé. Une modélisation a permis de mettre en évidence les éléments-clé de ce système, et l'évaluation du rendement a été entreprise. Celle-ci a mis en lumière la problématique liée au rendement de l'étage de conversion. En effet, si le système de conversion implique une dépense constante d'énergie du fait de son fonctionnement ininterrompu, cette dernière peut être rédhibitoire lorsque la puissance fournie par la source est très limitée.

Afin de proposer une solution à ce problème, un second système d'alimentation à stockage a été proposé. Ce dernier, composé de deux étages identiques à celui du système précédent, a vu son mode de fonctionnement être détaillé. A l'aide d'un modèle construit sur la base du premier système, les sources de pertes ont été localisées et le rendement de l'alimentation identifié. Ce système représente une évolution de la version mono-étagée dans le sens où elle permet d'atteindre les objectifs fixés pour un système alimentation à stockage intermédiaire en permettant d'atténuer le problème des pertes localisées au sein de l'unique système de conversion. Pour aller plus loin, des considérations sur le dimensionnement des accumulateurs ont été formulées pour

chacun des systèmes d'alimentation par stockage intermédiaire. Alors que dans le premier cas cette étape s'est avérée triviale, le développement a mis en évidence les degrés de liberté offerts par système bi-étagé pour le dimensionnement du stockage intermédiaire.

A la différence du filtrage ou de l'alimentation directe ou du filtrage, l'alimentation par stockage intermédiaire (mono- ou bi-étagée) introduit dans la chaîne un élément permettant de contrôler activement la puissance fournie par la source. Ce découplage complet des besoins en puissance de la charge et de la source permet d'introduire la notion d'amplification de puissance. En effet, même si les besoins en énergie des deux systèmes sont toujours liés, il a été démontré qu'il est possible d'alimenter un système intermittent à forte puissance instantanée depuis une source de faible puissance. On définit le *coefficient d'amplification de puissance* k_{sys} comme le rapport entre la puissance consommée par la charge et la puissance fournie par la source :

$$k_{sys} = \frac{P_{on}}{P_{in}} \quad (5.29)$$

Dans le cas idéal où le système est sans perte, le coefficient d'amplification du système est égal à l'inverse du rapport cyclique de fonctionnement de la charge D_{on} , car dans ce cas, la puissance moyenne consommée par la charge est égale à la puissance fournie par la source. Le chapitre suivant va illustrer le fonctionnement une alimentation bi-étagée en se focalisant notamment sur la capacité d'amplification de puissance de ce type de système.

AMPLIFICATION DE PUISSANCE

6.1 OBJECTIFS

Alors que les développements du chapitre 5 se sont focalisés sur la problématique des systèmes fortement intermittents ainsi que les solutions d'alimentation de ces derniers, ce chapitre souhaite axer son développement sur une application de système bi-étagé d'alimentation. Afin d'illustrer cette solution, un tel système va être implémenté en mettant en avant l'intérêt de l'alimentation bi-étagée à stockage intermédiaire.

En effet, alors qu'au chapitre précédent peu de considérations ont été formulées à propos de la source, l'exemple en question comporte une source d'énergie définie par des panneaux photovoltaïques qui sont, de par leur nature, limités en puissance. Alors que le problème est formulé de manière légèrement différente, les enjeux sont les mêmes que ceux mis en lumière par les développements précédents.

Les premiers paragraphes préciseront la définition du système et détailleront le fonctionnement de chacun des sous-systèmes ; l'accent sera mis sur l'intérêt et la nécessité de l'alimentation bi-étagée à stockage intermédiaire dans le cadre de cette application dont la source d'énergie est de faible puissance.

Le rendement de chacune des composantes du système sera évalué, puis les accumulateurs d'énergie seront dimensionnés selon les considérations formulées au point 5.6.

6.2 DESCRIPTION DU SYSTÈME

On souhaite s'intéresser à l'alimentation d'une charge dont la consommation est fortement intermittente et la fréquence de fonctionnement est faible. Le tableau 6.1 résume les contraintes de chacune des sources que le système d'alimentation doit interfacer. Le système qui doit être alimenté est un entraînement dont la caractéristique principale

Paramètre	Valeur
Puissance instantanée P_{on}	5kW
Durée d'enclenchement t_{on}	< 5s
Période de fonctionnement T_i	> 30min
Puissance de la source P_{in}	< 70W

TABLE 6.1 : Cahier des charges du système considéré

est un couple très élevé. Cependant, la forme d'interface entre l'étage d'accumulation et la charge est laissée libre.

6.2.1 Définition de l'étage d'alimentation de la charge

Par le tableau 6.1, les caractéristiques de la charge à alimenter sont particulières, dans le sens où le choix de l'accumulateur est prépondérant pour le rendement de l'alimentation. En effet, en plus que le rapport cyclique de fonctionnement soit extrêmement faible (environ 0.003), la décharge de l'accumulateur se déroule en un temps très court, et la puissance de décharge est importante.

En tenant compte de ces remarques, un grand nombre d'accumulateurs, incompatibles en densité de puissance, peuvent d'ores et déjà être exclus, comme les accumulateurs électrochimiques lithium-ion qui sont incompatibles avec un temps de décharge si bref. Plusieurs candidats existent cependant pour une telle application ; deux proposent une densité énergétique similaire : le supercondensateur ainsi que le stockage hydropneumatique. Si on tient compte de la description sommaire de l'application présentée plus haut, il paraît nécessaire de s'orienter vers un stockage hydropneumatique pour les raisons suivantes :

- En comparaison avec le supercondensateur, ce type de stockage présente une auto-décharge nulle (compatible avec un temps de charge long) ainsi qu'une durée de vie excellente [44] ;
- La forme d'interface hydropneumatique est un atout pour le système. En effet, les entraînements hydropneumatiques permettent un fonctionnement à fort couple, ce qui est plus délicat avec les entraînements électriques, notamment lorsque le rendement entre en ligne de compte.

Pour ces raisons, il a été décidé d'opter pour un système hydropneumatique pour le stockage et l'alimentation de l'application. De ce choix découle la nécessité de disposer d'un élément de conversion entre un système électrique (du côté de la source) et un système hydropneumatique. Ce système de conversion, associé à l'accumulateur et à la charge est représenté en figure 6.1. Cet étage est réalisé par un système d'entraînement-compression composé d'un moteur électrique (à gauche) couplé à une pompe hydraulique. Tout à fait à droite, on distingue la charge représentée par un entraînement hydraulique dont l'enclenchement est commandé par une vanne (au-dessus). En haut de la représentation du système, on distingue l'accumulateur hydraulique à membrane qui réalise le stockage d'énergie. Une valve anti-retour est placée entre la pompe et l'accumulateur. Malgré que cette dernière ait une influence sur le rendement, sa présence est nécessaire afin d'éviter la décharge de l'accumulateur via la pompe lorsque cette

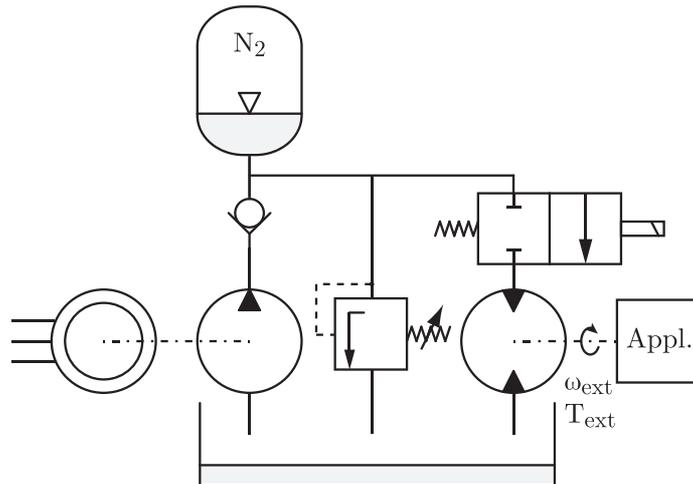


FIGURE 6.1 : Système de stockage hydro-pneumatique, conversion et charge

dernière est déclenchée. Finalement, au milieu, une valve de surpression est intégrée au dispositif pour des raisons de sécurité.

Le fonctionnement de cet étage d'accumulation peut être décrit de la manière suivante :

1. Lorsque le moteur électrique est alimenté, ce dernier entraîne la pompe, ce qui a pour conséquence une compression du gaz au sein de l'accumulateur.
2. Lorsque le moteur électrique est éteint, la valve anti-retour garantit le maintien de la pression au sein de l'accumulateur.
3. Lorsque la charge est enclenchée par l'activation de la vanne, la charge est alimentée par le système et la pression décroît au sein de l'accumulateur.

En figure 6.2 est mise en avant la consommation d'énergie électrique du moteur utilisé pour la compression en fonction de la pression au sein de l'accumulateur ainsi que de la vitesse de compression. De cette dernière, on remarque que la puissance minimale requise pour un fonctionnement du système varie entre 55W et 95W. La vitesse minimale de rotation de 1000 tours par minute est fixée pour deux raisons : le contrôle du moteur ainsi que le rendement de la pompe. Le paragraphe 6.3.2 détaillera le rendement de l'étage de compression.

6.2.2 Définition de la source

La source d'alimentation du système est un panneau photovoltaïque dont la puissance nominale est de 70W. La génération d'énergie par ce type de dispositifs n'est pas constante et dépend essentiellement des conditions d'ensoleillement. La figure 6.3 présente l'évolution de la puissance fournie par la source durant une journée ensoleillée, avec une couverture nuageuse négligeable.

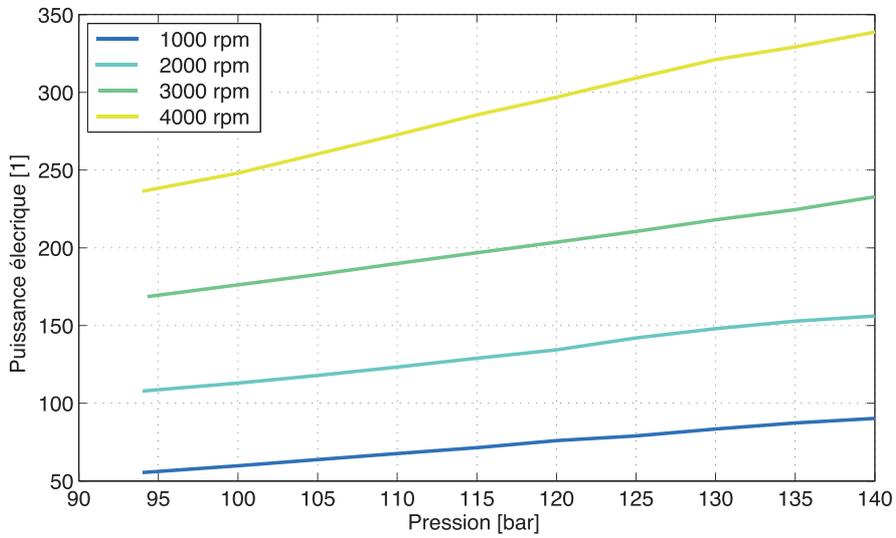


FIGURE 6.2 : Puissance électrique requise en fonction de la pression et de la vitesse de rotation

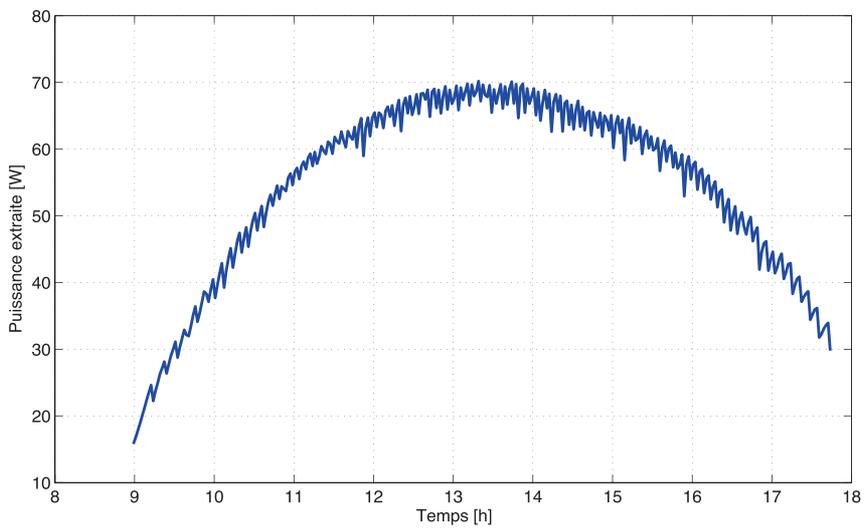


FIGURE 6.3 : Puissance extractible de la source d'énergie selon l'heure (29/07/2009) [45]

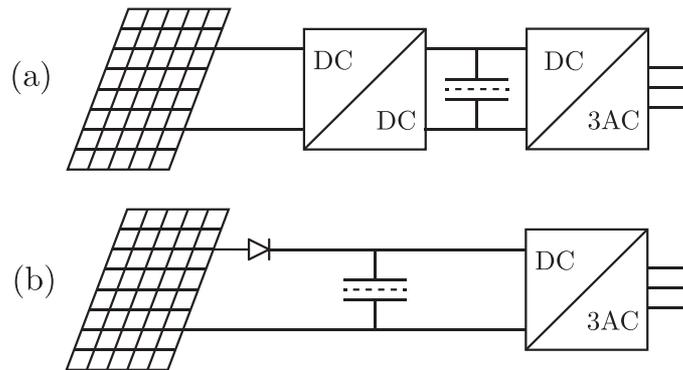


FIGURE 6.4 : MPPT photovoltaïque : système classique (a), alternative sans convertisseur (b)

6.2.2.1 Système classique

En première approche, l'alimentation du système de stockage hydropneumatique peut être implémentée de manière classique depuis les cellules photovoltaïques. De cette manière, l'énergie peut être extraite directement des cellules et, via un convertisseur d'interface, être injectée dans la pompe afin de charger l'étage d'accumulation. Cependant, en se référant aux figures 6.3 et 6.2, il est aisé de démontrer les limites d'une telle implémentation. En effet, les contraintes en puissance de la source et de la charge impliquent deux incompatibilités :

- avec une puissance crête de $70W$, la source n'est pas en mesure d'assurer l'alimentation du système de compression lorsque la pression dépasse $110bar$;
- même si le fonctionnement à pression élevée était toléré, la puissance minimale requise par le système de compression n'est atteinte que durant une plage horaire restreinte. Ainsi le système ne peut pas être alimenté en début ou fin de journée lorsque l'ensoleillement est insuffisant. Il en est de même lorsque les conditions météorologiques ne permettent pas aux cellules photovoltaïques de générer la puissance minimale requise.

6.2.2.2 Système à stockage intégré

Selon les précédentes remarques, l'alimentation mono-étagée à stockage intermédiaire ne permet le fonctionnement du système tel qu'il a été formulé par le cahier des charges introduit en début de ce chapitre. Ainsi, la solution de l'alimentation bi-étagée s'impose dans le cadre de ce système. Un accumulateur supplémentaire (étage A) doit permettre le stockage d'énergie afin de pouvoir fournir la puissance suffisante à l'alimentation de l'étage B décrit plus haut.

On propose d'introduire un accumulateur supercapacitif au sein de la chaîne d'alimentation. Une façon de procéder est dépeinte à la figure 6.4 (a). Dans ce cas de figure, un convertisseur DC/DC connecté directement aux cellules photovoltaïques assure la recherche du point de puissance maximale (MPPT — Maximal Power Point Tracking) de ces dernières. De l'énergie issue de la source solaire, le convertisseur charge l'élément supercapacitif connecté directement après celui-ci. Ainsi la puissance disponible aux bornes du supercondensateur est supérieure à la valeur fournie par les cellules

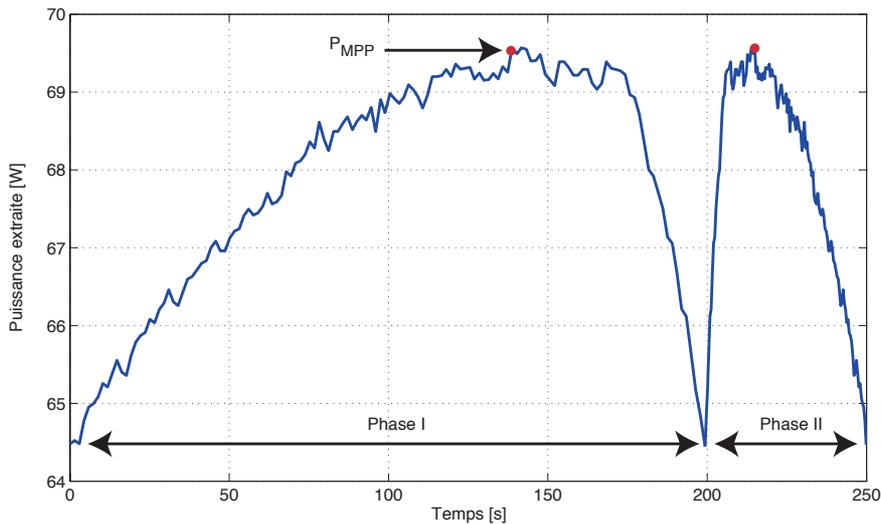


FIGURE 6.5 : MPPT par oscillation autour du point de puissance maximale

photovoltaïques. Lorsque la puissance requise par la charge de l'étage B excède celle fournie par la source solaire, le supercondensateur se décharge en fournissant la différence.

Cette chaîne de conversion présente un inconvénient majeur : le fonctionnement du convertisseur MPPT est ininterrompu. Les pertes générées par son fonctionnement détériorent le rendement du système, notamment en cas de faible ensoleillement (début et fin de journée, temps couvert). Pour cette raison, une seconde approche est préférée. Illustrée en figure 6.4 (b), cette variante qui prône la suppression du convertisseur MPPT est issue de [45].

Le convertisseur MPPT est remplacé par une diode qui est l'unique élément d'interface entre les cellules photovoltaïques et l'accumulateur supercapacitif. Sa présence est nécessaire ; elle empêche la décharge de l'accumulateur via les panneaux lorsque la tension générée par ces derniers est insuffisante pour assurer la charge (la nuit). L'extraction de l'énergie est assurée par charge et décharge successives de l'accumulateur supercapacitif. Ainsi, illustré en figure 6.5, le fonctionnement de cet étage peut être résumé de la manière suivante :

ETAPE I L'accumulateur supercapacitif se trouve dans un état partiellement déchargé.

La tension à ses bornes impose le point de fonctionnement de la source photovoltaïque. Alors que le supercondensateur se charge, la tension croît à ses bornes. Après un certain temps de charge, le point de puissance maximale est atteint ; la charge se poursuit jusqu'à une tension de supercondensateur préalablement fixée.

ETAPE II Dès que la tension de déclenchement est dépassée, le transfert d'énergie est déclenché par l'activation du convertisseur DC/3AC. Comme la consommation de cet élément est plus élevée que la puissance fournie par les cellules solaires, le supercondensateur se décharge et la tension à ses bornes décroît. Après un certain temps, le point de puissance maximale est atteint. La décharge se poursuit

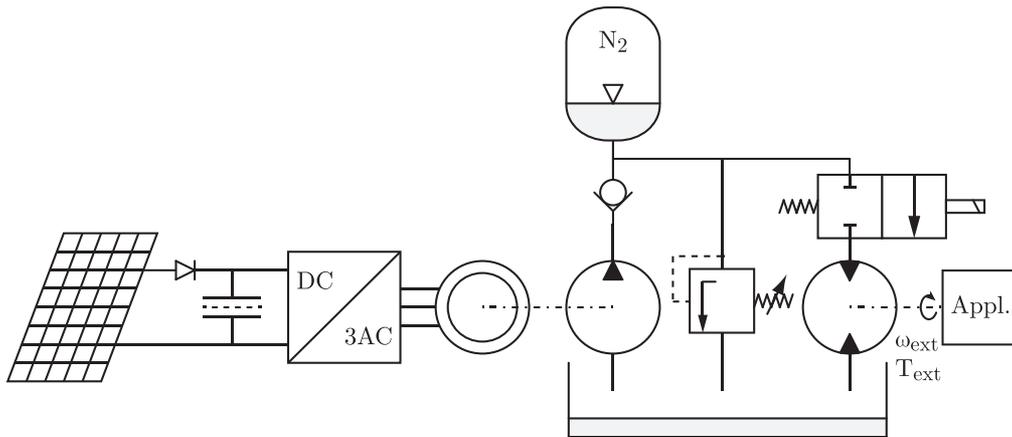


FIGURE 6.6 : Représentation schématique du système bi-étagé d'alimentation

jusqu'à ce que la tension de l'accumulateur atteigne une valeur préalablement fixée. Le convertisseur DC/3AC est alors désactivé et le fonctionnement du système reprend à l'étape I.

6.2.3 Système complet

Le système complet, composé de l'association des étages A (accumulateur supercapacitif) et B (accumulateur hydropneumatique), est représenté en figure 6.6. Selon les développements du chapitre 5 (figure 5.10 page 114), le fonctionnement d'une telle alimentation bi-étagée peut être divisée en 3 étapes distinctes. En plus des étapes I et II décrites ci-dessus, s'ajoute la dernière étape correspondant à l'alimentation de la charge par décharge de l'étage B. Ainsi, on résume le fonctionnement du système complet :

- ETAPE I** Les accumulateurs supercapacitif et hydropneumatique se trouvent dans un état partiellement déchargé. Alors que le supercondensateur (étage A) se charge, la tension croît à ses bornes. La charge se poursuit jusqu'à une tension de supercondensateur préalablement fixée.
- ETAPE II** Dès que la cette tension de déclenchement est dépassée, le transfert d'énergie est déclenché par l'activation du convertisseur DC/3AC. Comme la consommation de cet élément est plus élevée que la puissance fournie par les cellules solaires, le supercondensateur (étage A) se décharge et la tension à ses bornes décroît. En parallèle, l'accumulateur de l'étage B se charge ; en conséquence, sa pression augmente. Le transfert d'énergie entre les deux étages se poursuit jusqu'à ce que la tension de l'accumulateur supercapacitif (étage A) atteigne une valeur préalablement fixée. Le convertisseur DC/3AC est alors désactivé et le fonctionnement du système reprend à l'étape I.
- ETAPE III** Lorsque la pression de l'accumulateur hydropneumatique (étage B) atteint une valeur préalablement fixée, la décharge de l'étage B est amorcée par activation de l'électrovanne. La charge est alimentée en énergie. On dissocie la contribution énergétique en trois parties : la première provient de la décharge de l'accumulateur de l'étage B, la seconde de la décharge de l'accumulateur de l'étage A et la dernière directement de la source photovoltaïque. Une fois que la pression

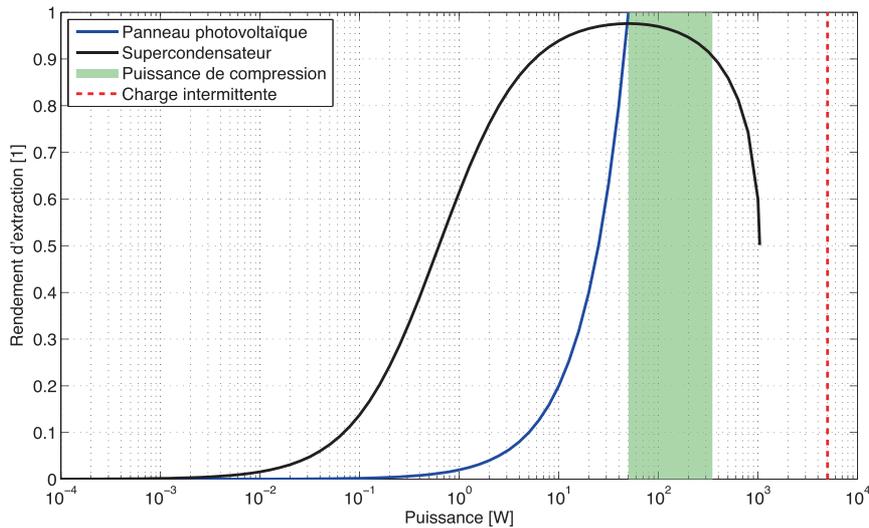


FIGURE 6.7 : Représentation des puissances en jeu et des caractéristiques de la source

de l'étage B atteint une valeur préalablement fixée, l'alimentation de la charge est arrêtée par désactivation de l'électrovanne. Le fonctionnement reprend à l'étape I.

La figure 6.7 présente les puissances ainsi que les caractéristiques de la source d'énergie et de l'accumulateur supercapacitif. Cette dernière met en évidence l'incompatibilité totale entre la source d'énergie et la puissance consommée par la charge intermittente. Elle souligne aussi que l'étage A seul ne permet pas d'atteindre les objectifs fixés pour l'alimentation de la charge.

6.2.4 Représentation et structure de commande

Le fonctionnement du système décrit, une représentation du système est proposée en figure 6.8. Alors que les développements précédents ont indiqué la présence d'un moteur de type *brushless* avec une alimentation triphasée, la représentation ci-contre fait mention d'une machine courant continu. Cette simplification est justifiée par le fait que l'objectif de ce chapitre ne se trouve pas dans le fonctionnement de la machine mais du système complet. De plus, lors de la validation expérimentale, le réglage de la machine sera réalisé par le biais d'un contrôleur du commerce ; l'étude de la structure réglage de la machine n'est donc pas justifiée.

De gauche à droite, on commente les différents blocs de la REM :

- La source photovoltaïque est modélisée comme une source de courant avec une caractéristique courant-tension classique d'une cellule photovoltaïque. Le courant I_{pv} fourni par la source ne peut pas être négatif ; la diode est donc incluse dans le modèle de source.
- L'accumulateur supercapacitif de l'étage A est défini par sa capacité C_s .
- Les trois blocs suivants forment l'ensemble convertisseur-moteur. Le convertisseur est modélisé comme un élément abaisseur commandé par un rapport cyclique D .

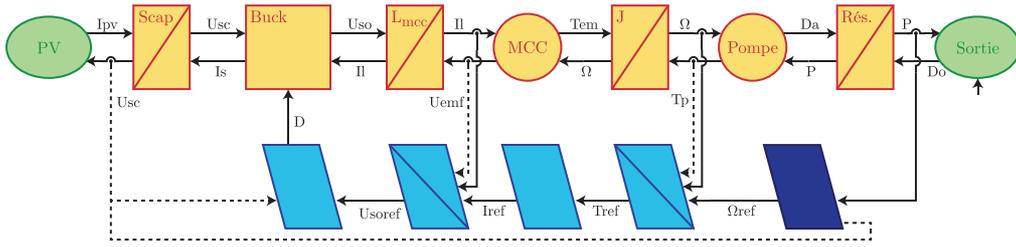


FIGURE 6.8 : REM et SMC du système

On note aussi les deux blocs définissant la machine à courant continu : l'inductance définie par sa valeur L_{MCC} et l'élément de conversion défini par la constante de couple k_{em} .

- L'inertie rapportée de l'arbre moteur est caractérisée par sa valeur J .
- L'élément de conversion représentant la pompe est caractérisé par une constante k_{da} exprimant la relation entre le volume d'huile la traversant par tour. Ainsi, l'élément fait interface entre le système mécanique (couple T_{em} et la vitesse angulaire Ω) et le système hydraulique (pression P et débit D_a) de la manière suivante :

$$\begin{cases} D_a = k_{da}\Omega \\ T_p = k_{da}P \end{cases} \quad (6.1)$$

- Le réservoir hydropneumatique est défini par la pression à vide P_0 et la constante k_v liant la pression au volume d'huile stocké :

$$P = \frac{1}{k_v} \int (D_a - D_o) dt + P_0 \quad (6.2)$$

- La sortie est représentée comme une source commandée en tout-ou rien. Lorsque celle-ci est activée, le débit d'huile prélevé de l'accumulateur D_o est constant, alors que lorsqu'elle est désactivée, le débit est nul.

La structure maximale de commande du système est explicitée en figure 6.8. Cette dernière met en évidence les deux voies d'action sur le système. La première est l'enclenchement de la sortie alors que la seconde est le contrôle de l'échange d'énergie entre les deux systèmes par le biais de la vitesse de rotation du moteur. Il apparaît alors 4 états distincts dans le fonctionnement du système et dans la définition du bloc de stratégie :

$\Omega_{ref} = 0$ ET *sortie* = 0 Cet état correspond à la phase de fonctionnement I. L'accumulateur de l'étage A est en cours de charge.

$\Omega_{ref} > 0$ ET *sortie* = 0 Cet état correspond à la phase de fonctionnement II. Un transfert d'énergie existe entre les étages A et B; l'accumulateur de l'étage A se décharge alors que celui de l'étage B se charge.

$\Omega_{ref} > 0$ ET *sortie* = 1 Cet état correspond à la phase de fonctionnement III. Les deux accumulateurs se déchargent simultanément et la charge est alimentée.

$\Omega_{ref} = 0$ ET *sortie* = 1 Cet état n'a pas été décrit dans le fonctionnement de l'alimentation bi-étagée, sous l'hypothèse que le fonctionnement des deux étages soit synchrone (paragraphe 5.5.3). Dans la réalité, il est difficile de garantir le strict synchronisme des deux étages. Ainsi, il est possible que l'accumulateur A se dé-

charge plus rapidement que l'accumulateur B. Cet état gère ce cas particulier où la recharge de l'étage A débute alors que la décharge de l'étage B se poursuit.

6.3 CONSIDÉRATIONS SUR LE RENDEMENT

6.3.1 *Système photovoltaïque*

Le rendement du système photovoltaïque et de l'étage A est abordé dans [45]. On retient que le choix des tensions d'enclenchement et de déclenchement de l'étage A sont primordiales dans le rendement d'extraction des cellules photovoltaïques. En effet, plus ces tensions sont éloignées du point de puissance maximum (supposé connu), moins bon sera le rendement.

Le dimensionnement de l'accumulateur supercapacitif a une influence sur la période de fonctionnement de l'étage A T_A . En effet, à tensions de déclenchement fixées, plus la capacité sera faible, plus t_A sera court.

Mis à part le problème du rendement, la puissance disponible aux bornes des cellules photovoltaïques dépend essentiellement de la position de ces dernières dans l'environnement et des conditions d'ensoleillement. Afin de garantir un fonctionnement quotidien du dispositif, des considérations sur la constance et la qualité de l'ensoleillement doivent être posées. Cependant, ces dernières vont bien au-delà du cadre de ce travail qui considère un fonctionnement idéal à puissance maximale du capteur.

6.3.2 *Système hydropneumatique*

Au sein du système hydropneumatique, on distingue deux sources principales de pertes. Le premier poste est défini par le système de pompage. En effet, dans ce dernier on compte :

- la conversion électrique pour le contrôle du moteur ;
- les pertes au sein du moteur ;
- les pertes au sein de la pompe (figure 6.9) ;
- les pertes dues à la présence de la valve anti-retour ;
- les pertes de charge dans les tuyaux.

La somme de ces dernières paraît être non négligeable selon les données des fabricants. L'exemple de la figure 6.9 met en évidence le mauvais rendement de la pompe utilisée. Le second poste de pertes est la compression du gaz à proprement parler. Alors que la compression est relativement lente et proche de l'isothermie, la décharge de l'accumulateur est extrêmement rapide et la détente du gaz implique un mauvais rendement d'extraction. Malgré cela, et vu que cette application ne se focalise pas sur le rendement total, ce poste de pertes n'a pas été abordé. Il est cependant possible de retrouver une expression du rendement dans [43].

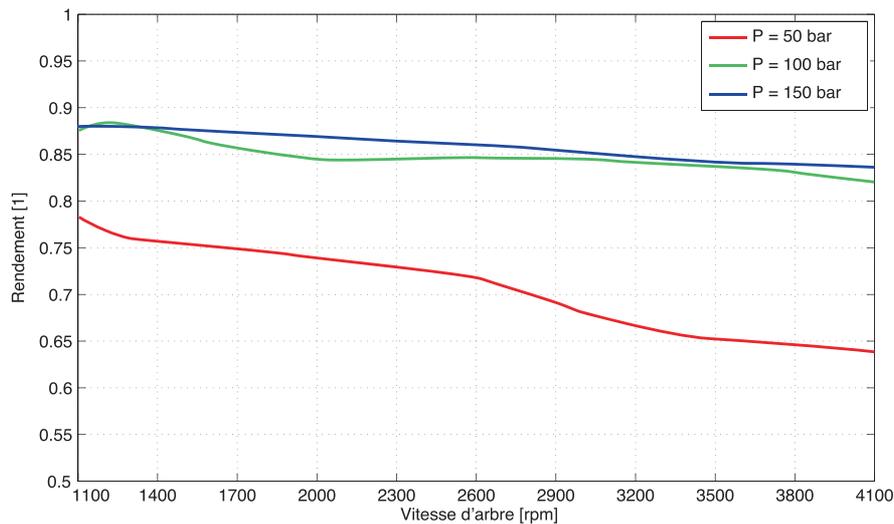


FIGURE 6.9 : Rendement de la pompe hydraulique en fonction de la pression et de la vitesse de rotation (données fabricant)

6.4 VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Le système sur lequel ce base la validation expérimentale de l'alimentation bi-étagée est représenté en figure 6.10. Ce dernier comprend tous les éléments décrits dans ce chapitre. La carte de contrôle numérique du système a fait l'objet d'un développement spécifique à ce cas. En plus d'assurer les fonctions de commande et de supervision de l'ensemble, cette dernière permet le contrôle à distance de l'application via une connexion GSM/HSDPA.

Suite aux considérations sur le rendement du paragraphe 6.3.2, une mesure *in situ* du rendement de compression a été réalisée. Cette dernière, représentée en figure 6.11 exprime le rapport entre la puissance mesurée à l'entrée de l'accumulateur hydropneumatique (pression fois débit) et la puissance prélevée de l'accumulateur supercapacitif. Conformément aux craintes exprimées plus haut, le rendement de compression est inférieur à 50%. On note cependant les remarques suivantes :

- A faible vitesse, le rendement s'effondre dès que la pression augmente. Ceci est dû en partie au fonctionnement de la pompe qui est peu efficace à ce régime. On relève aussi que la consommation du contrôleur du moteur est importante, même en fonctionnement à vide.
- A vitesse élevée, le débit est important. Compte tenu du faible diamètre des tuyaux, les pertes de charge localisées au sein de ces derniers sont importantes et justifient certainement un rendement plus faible.
- Pour les cas intermédiaires, le rendement croît avec la pression. Ceci est expliqué par l'augmentation de la puissance qui traverse le système et qui atténue les postes de pertes fixes.

Suite à ces essais, et malgré le faible rendement de compression, le système d'alimentation bi-étagée a été mis en service. Plusieurs essais ont été réalisés. Un chronogramme

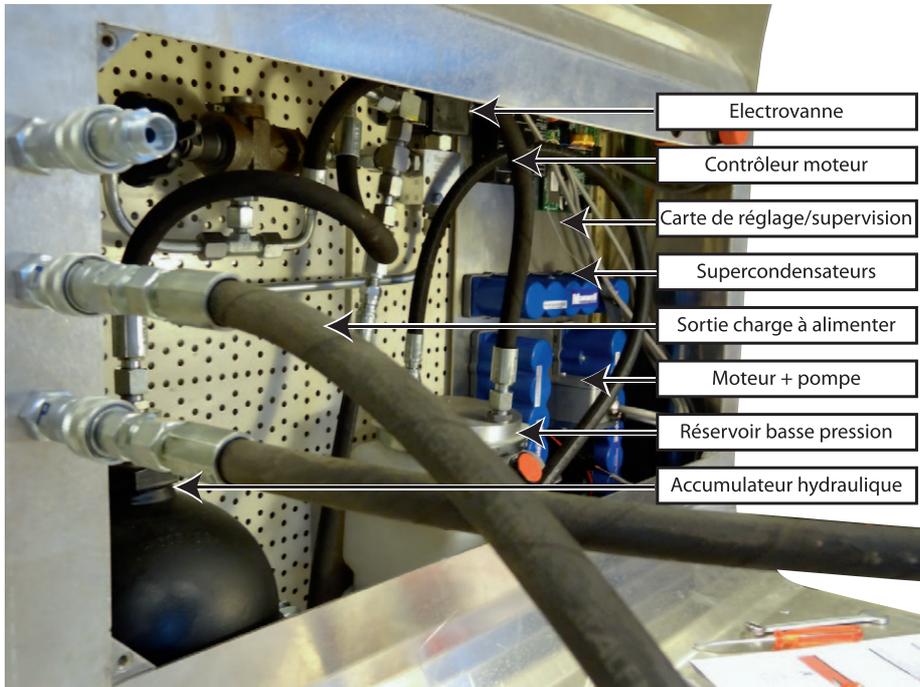


FIGURE 6.10 : Système bi-étagé d'alimentation utilisé pour la partie expérimentale

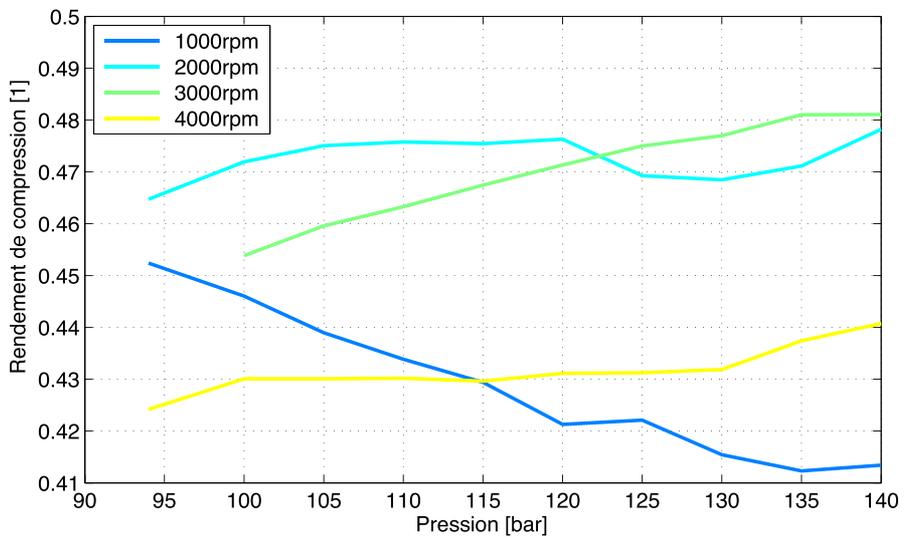


FIGURE 6.11 : Mesure du rendement de la conversion électrique — mécanique

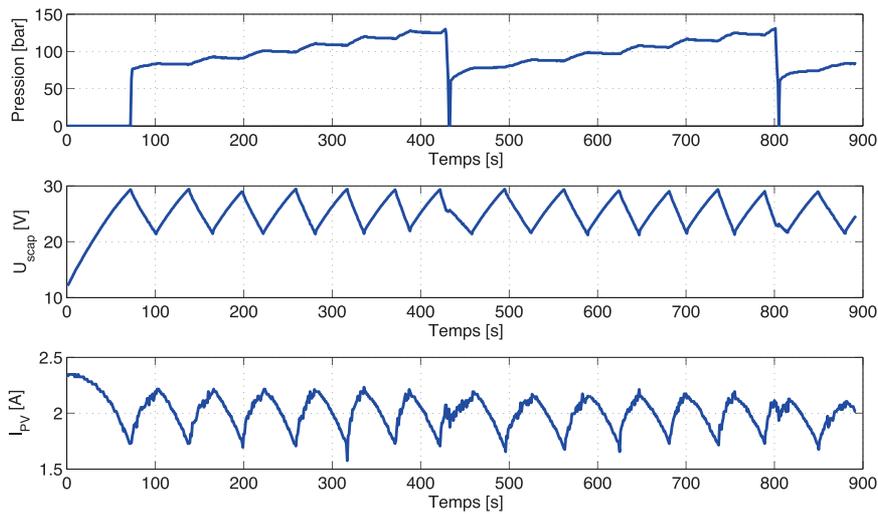


FIGURE 6.12 : Mesure du fonctionnement du système

de l'un de ces essais est représenté en figure 6.12. Sur la première partie du graphique présentant l'évolution de la pression, après la charge initiale du système, on distingue la période de fonctionnement du système T_i qui vaut ici 350s environ.

Comme prévu, le synchronisme des deux étages n'est pas atteint dans un système réel. Ainsi, une période de fonctionnement du système comprend environ 7.2 périodes de l'étage A. On relève aussi que la stratégie implémentée lors des essais imposait une vitesse constante au moteur lors du transfert d'énergie entre les deux étages. Ainsi, plus la pression augmente au sein de l'accumulateur hydraulique, plus la puissance transférée croît. Ceci explique le raccourcissement de la période de fonctionnement de l'étage A (T_A) au fur et à mesure que la pression augmente ; cette période est clairement visible sur le second chronogramme qui indique l'évolution de la tension de l'accumulateur supercapacitif.

Sur la même figure on note que les tensions de début et fin de charge de l'étage A ont volontairement été choisies éloignées du point de puissance maximale afin de conserver T_A suffisamment grand pour décrire le fonctionnement du système. Malgré ces larges excursions autour du MPP, la puissance extraite des cellules varie dans l'intervalle [47; 53] W avec une moyenne à 51W, soit un rendement d'extraction de 96.6%.

La charge a été simulée par un court circuit au niveau du système hydraulique. Etant donné les tuyaux de faible diamètre utilisés sur ce système, l'énergie est dissipée par les pertes de charge au sein du circuit. Bien que la puissance dissipée par le court-circuit hydraulique ne soit pas constante, le temps de décharge correspond à la donnée ; cette dernière dure 4s environ. La mesure de la puissance dissipée par la décharge de l'accumulateur n'étant pas réalisable, il a été décidé d'estimer la quantité d'énergie stockée au sein de l'accumulateur. Ainsi, de par la connaissance de ses caractéristiques et la mesure de la pression, il est aisé de déduire l'énergie stockée. Ainsi, avec une fin de charge de l'étage B choisie à $P = 130\text{bar}$, l'énergie stockée au sein de l'accumulateur est estimée à 6498J.

Le rendement de la décharge de l'étage B n'ayant pas été estimé, une hypothèse sur un rendement de décharge de 0.9 permet d'exprimer les caractéristiques du système d'alimentation bi-étagée mis en place dans le cadre de travail. Avec une puissance moyenne de décharge de

$$\langle P_{on} \rangle = 1462W$$

le rendement du système est évalué à

$$\eta = 36.4\%$$

Ce dernier est faible en raison du système de compression qui présente un mauvais rendement. Le coefficient d'amplification de puissance introduit au point 5.7 peut finalement être évalué dans le cadre de cette application :

$$k_{sys} = 28.7$$

6.5 SYNTHÈSE

Ce dernier chapitre s'est focalisé sur la validation du principe d'alimentation bi-étagée introduit au chapitre 5. Une description des contraintes du système a permis de mettre en évidence la nécessité de l'alimentation bi-étagée. En effet, dans ce cas particulier, il existe une non-adéquation totale en puissance entre la source et la charge qui n'a pas pu être résolue par l'usage d'une solution mono-étagée.

L'usage de la solution retenue a été justifié ; les principes et les phases de fonctionnement ont été décrits. La modélisation du système a été réalisée et une structure de réglage a été proposée. Des considérations ont été émises à propos du rendement des sous-systèmes. Le mauvais rendement de l'étage du convertisseur de l'étage B (compression) a été mis en évidence ; ce dernier est dû à l'usage de composants dont les performances ne sont pas optimisées.

Finalement, la validation du principe de l'alimentation bi-étagée a été présentée. Le prototype utilisé dans le cadre de cette validation a été décrit, puis les performances de ce dernier ont été mesurées et présentées. De ces dernières est issu le rendement de fonctionnement du système, plutôt faible, ainsi que le coefficient d'amplification de puissance.

Malgré le rendement peu élevé de l'adaptation en puissance, ce chapitre a proposé une méthode pour rendre compatible le transfert entre une source et une charge *a priori* incompatibles. En effet, alors que la puissance crête de la première ne dépasse pas 70W, la puissance requise pour le fonctionnement de la seconde est supérieure d'un facteur de plusieurs dizaines. Pour aller plus loin, le rendement d'un tel système doit pouvoir être optimisé par un choix judicieux de composants. Dans un second temps, on peut aisément envisager l'optimisation du convertisseur de l'étage B, source de la majorité des pertes, ainsi que du choix motivé de la vitesse de rotation de l'arbre moteur dans le but d'augmenter le rendement.

Cinquième partie

CONCLUSION

CONCLUSION GÉNÉRALE

7.1 RÉSUMÉ

La question de l'alimentation en énergie a été au centre des préoccupations et des développements de ce travail. En effet, alors que l'introduction met en évidence le besoin croissant de stockage énergétique au sein même du réseau de distribution, la nécessité d'assurer constamment l'adéquation entre la génération et la consommation d'énergie au sein de ces derniers implique l'usage de systèmes de génération de nature différente. Dans le cadre de cet exemple introductif, la nécessité de systèmes de stockages a été ainsi justifiée.

Après avoir défini les termes-clé nécessaires à la bonne compréhension des objets étudiés, le chapitre 2 a proposé une classification des sources d'énergie en fonction de leurs propriétés intrinsèques : flux d'énergie, forme d'interface, etc. A l'aide de ces dernières, des règles d'association de sources d'énergie ont été proposées, de sorte à définir les prérequis à l'alimentation directe d'un système mono-source. Afin de mettre en évidence l'impact des sollicitations d'un système à alimenter sur son unique charge, 4 modèles de charges et un modèle simplifié de source ont été proposés. Pour chacune des combinaisons, le rendement d'extraction d'énergie a été mis en évidence. Afin de pouvoir comparer les quatre cas, une méthode de représentation du rendement d'extraction d'énergie a été proposée : la représentation modifiée de Ragone.

Alors que le chapitre 2 a détaillé l'alimentation directe d'un système, le chapitre 3 s'est focalisé sur l'alimentation d'une charge par un système multi-source, donc hybride. Dans un premier temps, la transition d'un système mono-source à un système multi-source a été commentée. Les degrés de liberté mis en avant par ces systèmes ont été décrits, notamment dans les flux d'énergie entre chacun des composants. Dans un second temps, une classification des systèmes d'alimentation hybrides a été proposée. A contrario des classifications traditionnelles, la variante proposée se focalise sur la fonctionnalité que l'alimentation hybride confère au système. La justification de cette classification se trouve dans les considérations sur le type des sources et les considérations sur le dimensionnement qui sont communs à chaque fonctionnalité.

A titre d'exemple, le chapitre 4 s'est focalisé sur l'étude et le dimensionnement d'un accumulateur hybride. La fonctionnalité qui a dû être mise en oeuvre par ce dernier est la capacité de proposer une recharge rapide. La fonctionnalité du système hybride entre ainsi dans la catégorie *versatilité*; les accumulateurs ont été choisis selon les recommandations du chapitre 3. L'étude détaillée du système a laissé une place importante à l'étude de la charge rapide. Le rendement de cette dernière a été détaillé et le sur-dimensionnement des accumulateurs dépeint. En fin de chapitre, la validation expérimentale sur un prototype dédié à cette application a été détaillée, et le rendement de la charge rapide a été mesuré et analysé.

Après avoir constaté les conséquences de la charge rapide, abordée au chapitre 4, le chapitre 5 a proposé d'assimiler ce problème à l'alimentation d'une charge fortement intermittente et, par ce biais, de généraliser l'approche. Après une classification des systèmes intermittents et des solutions d'alimentation de ces derniers, la nécessité d'une alimentation par stockage intermédiaire est mise en avant pour les charges fortement intermittentes à basse fréquence. Dans ce sens, le concept de l'alimentation par stockage intermédiaire a été décrit, modélisé et son rendement évalué. Après avoir mis en évidence un point faible de ce système, une solution a été proposée par l'introduction d'un double étage de stockage. Après la description du fonctionnement de ce système, le rendement de ce dernier a été, lui aussi, évalué. Finalement, pour chaque solution d'alimentation à stockage intermédiaire, des considérations sur le dimensionnement des étages d'accumulation ont été formulées.

Le chapitre 6 a introduit une application originale où un système d'alimentation à double stockage intermédiaire est nécessaire. Après description du principe de fonctionnement de chacun des sous-systèmes, le fonctionnement global a été représenté et modélisé. Une stratégie de réglage a été décrite et des considérations sur le rendement du système sont abordées. Une validation expérimentale du système à double stockage intermédiaire a finalement été proposée, et le rendement de ce dernier est comparé aux évaluations abordées plus tôt.

7.2 RÉSULTATS ET CONTRIBUTIONS

De la formulation du problème à la proposition de solutions, ce travail s'est focalisé sur la problématique de l'alimentation des systèmes intermittents. On rappelle les éléments-clé de ce travail :

- L'étude des sollicitations des charges intermittentes a permis, sur la base de modèles simples de sources d'énergie, de mettre en évidence le mauvais rendement de leur alimentation.
- Une représentation du rendement d'extraction de l'énergie a été proposée. Contrairement aux représentations classiques, la *représentation de Ragonne modifiée* permet d'exprimer le rendement d'extraction pour des charges intermittentes; de plus, cette représentation permet de comparer les rendements d'un même accumulateur en fonction des sollicitations en puissance qui lui sont imposées.
- L'intérêt des solutions d'alimentation hybrides pour résoudre la problématique du faible rendement de l'alimentation des systèmes intermittents a pu être mis en évidence. Cependant, l'intérêt des systèmes hybrides est beaucoup plus large. Dans ce sens, la différence entre l'alimentation directe et l'alimentation hybride a été abordée, en fonction des combinaisons et des types d'accumulateurs connectés.

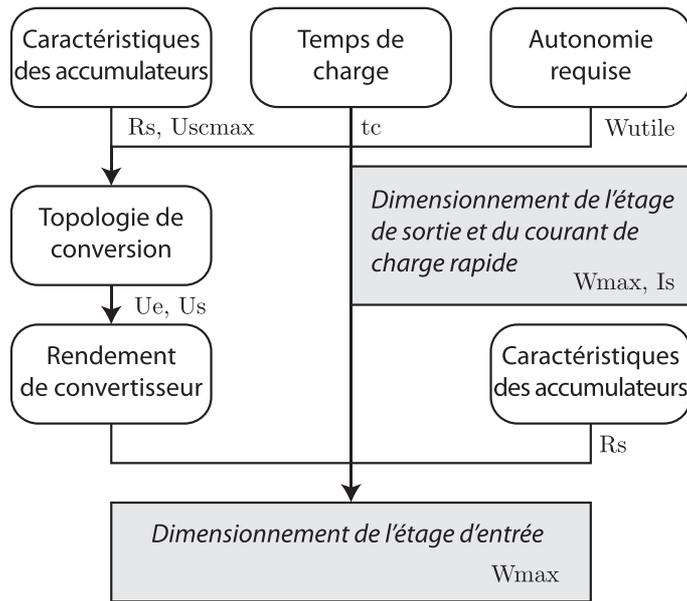


FIGURE 7.1 : Méthode de dimensionnement d'un système de charge rapide

Dans le but de catégoriser l'ensemble des systèmes d'alimentation hybrides, une classification a été établie en regroupant les systèmes par la fonctionnalité qu'une alimentation hybride confère à l'ensemble. Ainsi, il a été proposé de distinguer 4 fonctionnalités associées à une alimentation hybride : *énergétique, spectrale, redondance et versatilité*.

- L'illustration du dimensionnement d'un système hybride, dans le cas particulier traité, a mis en évidence la nécessité d'un transfert rapide d'énergie entre deux accumulateurs. La *procédure de dimensionnement* proposée, dont le cheminement est représenté en figure 7.1, prend en compte les pertes énergétiques au sein de chaque accumulateur et du système de conversion en fonction de la durée du transfert et de la quantité d'énergie qui doit pouvoir être stockée. Bien que cette dernière ait été développée dans le cadre de systèmes basse tension, la validité de la procédure proposée peut s'étendre aux systèmes à tension ou puissance plus élevée.
- Le souhait de généraliser la problématique de l'alimentation des systèmes intermittents, dont fait partie la charge rapide, a conduit à l'énumération des méthodes permettant d'alimenter un système intermittent. Par ce biais, il a été mis en évidence que l'alimentation de charges fortement intermittentes à basse fréquence sont problématiques en termes de rendement.
- Une solution pour l'alimentation de ces systèmes a été proposée par le biais d'un *stockage intermédiaire*. Deux variantes de cette solution ont été proposées, modélisées et étudiées.
- Deux validations expérimentales ont été entreprises. La première a conduit à valider un accumulateur hybride avec recharge rapide, tandis que la seconde s'est focalisée sur l'alimentation bi-étagée à stockage intermédiaire.

7.3 PERSPECTIVES

A l'issue de ce travail, on entrevoit de nombreuses pistes pour des développements ultérieurs. On retient notamment la possibilité de :

- étendre la représentation de Ragone modifiée afin que cette dernière puisse aussi exprimer des comportements à la charge des accumulateurs ainsi que les rendements à la charge ;
- se focaliser sur la classification des systèmes hybrides et poursuivre dans la recherche de critères de dimensionnement communs aux systèmes hybrides proposant une fonctionnalité similaire ;
- proposer un système de recharge rapide pour des applications dont la puissance est plus élevée, comme par exemple la recharge rapide de véhicules électriques ;
- évaluer l'intérêt du sous-dimensionnement de l'accumulateur tampon du chargeur rapide en autorisant une contribution énergétique du réseau domestique lors de la phase de charge ;
- résoudre les points laissés en suspens dans le cadre de la validation du système bi-étagé d'alimentation : algorithme de recherche du point de puissance maximale, modélisation des pertes au sein de l'accumulateur hydropneumatique, etc.

Finalement, en laissant à l'écart les considérations strictement technico-scientifiques, il peut être justifié de remettre en question le postulat fondamental sur lequel est basé une grande partie des considérations de ce travail. En effet, depuis l'introduction de ce travail, il est sous-entendu que la demande en énergie de la source doit toujours être satisfaite, comme, par exemple, dans les réflexions sur :

- l'équilibre entre génération et consommation d'énergie sur les réseaux électriques ;
- la connexion directe de sources ;
- les systèmes hybrides, dont, par exemple, la fonctionnalité spectrale vient à pallier aux sources trop lentes.

Quelles conséquences émergeraient d'une non-réponse ou d'une réponse retardée à un besoin énergétique ? Certes, de nombreuses applications sont critiques ; s'agit-il cependant de la majorité des consommateurs d'énergie ?

Dans le cadre de l'approvisionnement énergétique, la vision actuelle est de satisfaire à un besoin. Dans ce sens, et à l'image de la figure 7.2 , la nécessité de satisfaire un besoin énergétique dont la variation est permanente, implique, par causalité intégrale, la notion de stockage de l'énergie mais aussi de boucle de rétro-action. Dans ce sens, il est nécessaire de connaître le besoin, mais aussi toute la chaîne de génération afin de satisfaire le besoin. Ne serait-il pas plus sain de casser ce schéma de besoin nécessaire pour se tourner vers une politique d'adaptation de la consommation en fonction de la capacité des sources à générer de l'énergie ?

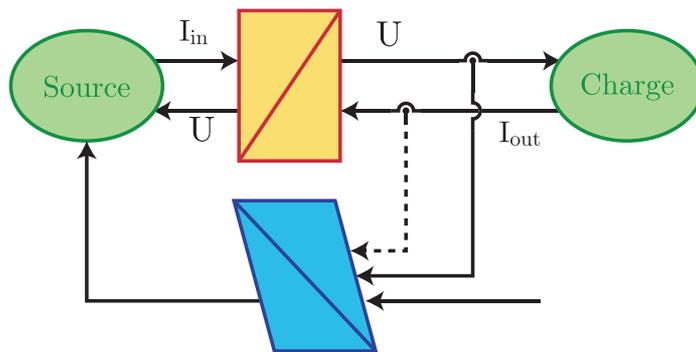


FIGURE 7.2 : Connaître le système pour satisfaire la demande énergétique

Sixième partie

ANNEXES

REPRÉSENTATION ÉNERGÉTIQUE MACROSCOPIQUE (REM)

Tout au long de ce travail, il a été fait usage de la représentation énergétique macroscopique afin d'illustrer, représenter, mais aussi modéliser les systèmes énergétique. Cet annexe a pour but de présenter brièvement cet outil afin de permettre au lecteur la compréhension des nombreuses figures y faisant référence.

A.1 PRÉSENTATION

Développé par le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP), France, ce formalisme est utilisé pour représenter les systèmes énergétiques sous la forme de leur description fonctionnelle [21]. Depuis 2000, cette représentation est mise en avant pour les caractéristiques qu'elle propose, par rapport aux autres représentations graphiques tels le Bond Graph (BG), Petri Nets, etc.

Principe d'action-réaction

Les éléments (ou sous-systèmes) composant une REM sont connectés entre-eux par le biais de deux flèches disposées en anti-parallèle. Ces deux voies représentent les variables d'action d'un bloc donné sur son voisin (flèche sortante), ainsi que la réaction (flèche entrante) du bloc voisin.

De ce principe d'action est définie la puissance échangée entre deux blocs. En effet, au sein d'une REM, le produit des variables d'action et de réaction entre deux éléments est une représentation de la puissance échangée. Des exemples de couples de variables d'action et de réaction sont donnés dans le chapitre 2.

A l'inverse de ce qui se fait dans la représentation des systèmes électriques où un élément peut être connecté à plusieurs autres, dans une REM, une connexion entre deux blocs de base ne peut pas être partagée avec un troisième. La figure A.1 présente

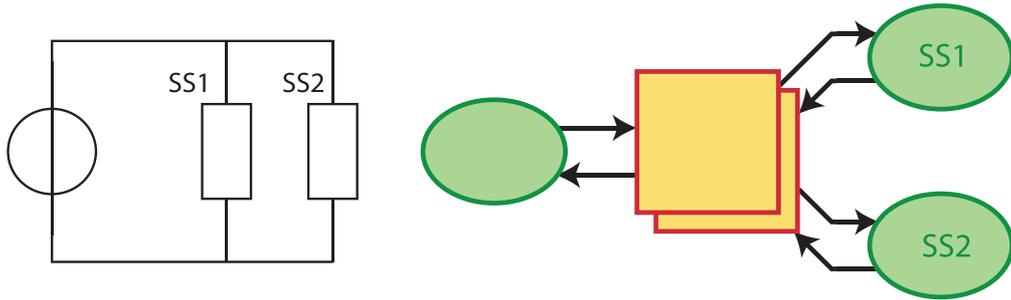


FIGURE A.1 : Définition explicite du partage d'énergie

la représentation correcte d'un système électrique simple où deux sous-systèmes se partagent l'énergie fournie par une source de tension. Dans la REM, le partage de l'énergie doit être explicitement défini par l'usage d'un bloc de couplage.

Causalité intégrale

A l'image de plusieurs outils de représentation et modélisation, la REM se fonde sur la causalité intégrale (physique) uniquement. Dans ce sens, il existe deux types de blocs au sein de la REM. Les blocs dont les relations sous-jacentes ne dépendent pas du temps et ceux qui en dépendent explicitement. Dans ce second cas, la causalité intégrale est systématiquement mise en oeuvre, dans les blocs d'accumulation notamment, dans lesquels la sortie est exprimée par une fonction intégrale des entrées.

A.2 BLOCS DE BASE

Le tableau A.1 recense les principaux blocs utilisés dans le cadre de la représentation énergétique macroscopique.

A.3 INVERSION ET STRUCTURE MAXIMALE DE COMMANDE

Issue du Causal Ordering Graph (COG), la définition de l'inversion d'une REM afin d'obtenir la structure maximale de commande (SMC) répond à la phrase : "Alors que l'effet de la cause est connu, il est simplement nécessaire de générer la bonne cause afin d'obtenir l'effet désiré." [46]. Dans ce sens, il est possible d'inverser chaque bloc d'une REM afin d'obtenir la structure de commande. On dénombre deux types d'inversions : l'inversion directe d'un bloc ne dépendant pas du temps et l'inversion d'un bloc au comportement intégral qui se résout par l'usage d'un régulateur et de mesures additionnelles.

Le tableau A.2 référence les blocs couramment utilisés dans le cadre de la définition d'un schéma de contrôle.

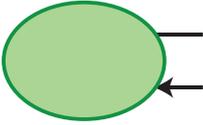
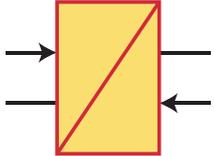
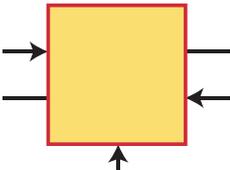
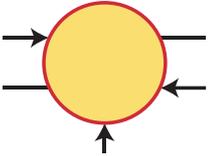
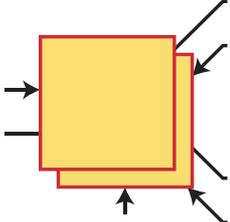
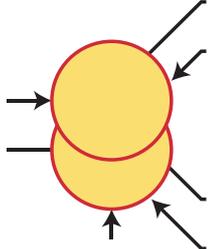
Représentation	Nom	Description, exemples
	Source d'énergie	Alimentation électrique, réaction de l'environnement, interface du système, etc.
	Elément d'accumulation	Accumulateur d'énergie : inertie, inductance, etc.
	Conversion monophysique	Convertisseur électrique, réducteur, etc.
	Conversion multiphysique	Machine électrique, pompe, etc.
	Couplage monophysique	Connexion électrique série/parallèle, axe mécanique à plusieurs éléments, etc.
	Couplage multiphysique	Certaines machines électriques, conversions multiphysiques à plusieurs sorties, etc.

TABLE A.1 : Principaux blocs de la REM

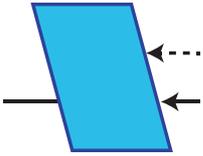
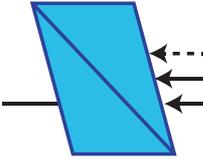
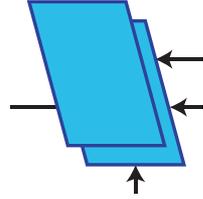
Représentation	Nom
	Inversion directe
	Inversion indirecte
	Inversion de couplage
	Bloc de stratégie

TABLE A.2 : Principaux blocs d'inversion de la REM

MODÈLE DE PERTES DU CONVERTISSEUR DE CHARGE RAPIDE

Au cours du chapitre 4, un système de recharge rapide est étudié. Il est alors montré que le rendement de la charge rapide, défini par le rendement du convertisseur et des accumulateurs qui prennent part au transfert d'énergie, est prépondérant dans le dimensionnement de ce dernier. En effet, le transfert d'énergie (appelée, dans le contexte du chapitre 4, charge rapide) prend place entre deux accumulateurs supercapacitifs ; l'un fournit l'énergie et se décharge, alors que le second emmagasine l'énergie et se charge.

Plus le rendement du transfert d'énergie est mauvais, plus l'accumulateur qui se décharge doit fournir de l'énergie au système. Donc, afin de permettre que transfert d'énergie se déroule dans son intégralité, cet accumulateur doit pouvoir stocker plus d'énergie. Il devient alors évident que le dimensionnement de ce dernier est un point clé dans la démarche de réalisation du système de charge rapide.

Cet annexe présente le modèle de pertes qui a été utilisé pour permettre l'évaluation du rendement du processus de charge rapide, et le dimensionnement adéquat des accumulateurs.

B.1 PERTES DU CONVERTISSEUR

La topologie du convertisseur qui a été choisie pour le système dont le rendement doit être déterminé est de type abaisseur, comme cela a été décrit au § 4.4.3. Du fait de la présence de tensions peu élevées de part et d'autre du convertisseur et de l'amplitude élevée du courant commuté, le choix de la technologie des semi-conducteurs utilisés s'est évidemment orientée vers le MOSFET. Pour cet ordre de grandeur de tensions, cette famille de composants permet de conjuguer de faibles pertes en commutation à une résistance à l'état enclenché de très faible valeur, parfois inférieure au mliohm. Dans les lignes qui vont suivre, les sources de pertes seront énumérées. Pour chacune d'entre-elles, l'énergie dissipée pour chaque période de commutation sera définie.

Pertes par conduction

Les pertes par conduction sont définies par l'énergie dissipée dans le chaque semi-conducteur lorsqu'il est à l'état passant. Ces dernières dépendent donc du courant, de son ondulation et du rapport cyclique. Il est supposé que le fonctionnement du convertisseur soit en mode synchrone, où la diode de roue libre est, lorsque c'est possible, court-circuitée par l'enclenchement du transistor adjacent afin de s'affranchir des pertes en conduction engendrées par la tension de jonction de celle-ci.

Pour le transistor du haut de la cellule de commutation (S1), les pertes par conduction interviennent durant la première phase de la période de commutation T . Elles se chiffrent de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 W_{S1ds} &= \int_0^{DT} R_{ds} I_d^2 dt & (B.1) \\
 &= R_{ds} \int_0^{DT} \left(I_{min} + \Delta I \frac{t}{DT} \right)^2 dt \\
 &= DTR_{ds} \left(I_{min}^2 + I_{min} \Delta I + \frac{\Delta I^2}{3} \right)
 \end{aligned}$$

Pour le semi-conducteur du bas, il est supposé que le temps durant lequel le courant circule dans la diode est négligeable en regard de celui où ce dernier circule en conduction inverse dans le transistor. En effet, l'hypothèse de fonctionnement synchrone de la cellule de commutation est formulé. Pour garantir ce mode, la seconde condition est que la tension de jonction de la diode intrinsèque soit inférieure à la chute de tension du transistor à l'état passant. Ainsi, il est possible d'exprimer les pertes en conduction dans cet élément par une équation similaire à 152, en remplaçant D par $(1 - D)$.

Pertes de commutation

Les pertes par commutation sont définies comme la puissance dissipée au sein des semi-conducteurs lors de la transition entre l'état passant et l'état bloqué et vice-versa. En accord avec la figure B.1 qui définit les instants-clé de la commutation selon [47], les pertes par commutation pour des transistors de type MOSFET sont définies de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 W_{S1OFF} &= \int_{t1}^{t2} I_{max} U_e \frac{t}{t2 - t1} + \int_{t2}^{t3} U_e I_{max} \left(1 - \frac{t}{t3 - t2} \right) \\
 &= \frac{U_e I_{max}}{2} [(t2 - t1) + 2(t3 - t2) - (t3 - t2)] \\
 &= \frac{U_e I_{max}}{2} t_{off} & (B.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{S1ON} &= \int_{t3'}^{t5} I_{min} U_e \frac{t}{t5 - t3'} + \int_{t5}^{t1'} U_e I_{min} \left(1 - \frac{t}{t1' - t5} \right) \\
 &= \frac{U_e I_{min}}{2} t_{on} & (B.3)
 \end{aligned}$$

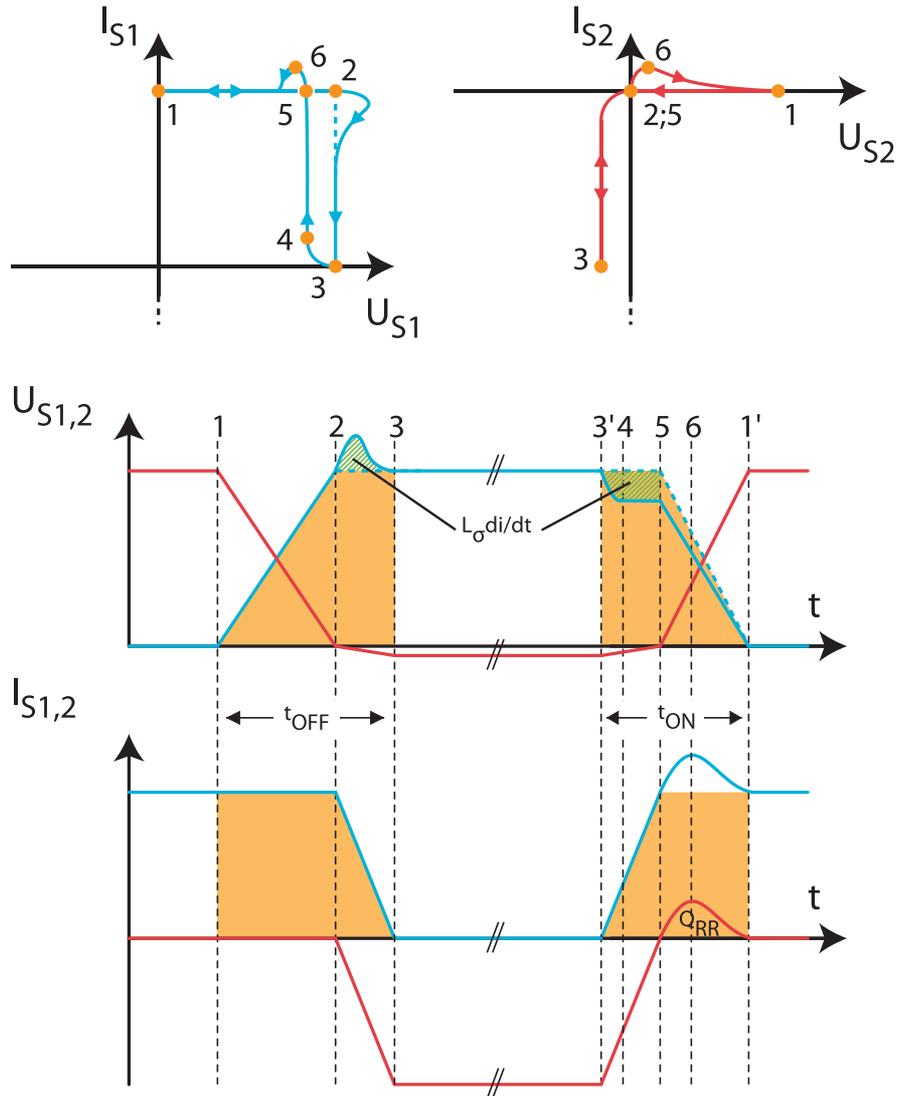


FIGURE B.1 : Commutation des semi-conducteurs, instants-clé

Sur la figure B.1, on note l'influence de l'inductance parasite du semi-conducteur. Cette dernière doit être prise en compte pour une évaluation correcte des pertes. Toutefois, il est possible de considérer, dans un but de simplification, que les pertes propres à cet élément parasite se compensent à l'enclenchement et au déclenchement.

Malgré le fait que le fonctionnement de la cellule de commutation soit synchrone, durant l'intervalle entre le déclenchement commandé du transistor du bas (S2) et l'enclenchement de celui du haut (S1), le courant s'établit dans la voie de roue libre définie par la diode intrinsèque à S2. Ainsi, l'enclenchement forcé de S1 induit des pertes par recouvrement inverse dans la diode, due à l'extinction rapide du courant au sein de cette dernière et ensuite à l'extraction des charges nécessaire à sa repolarisation ultérieure. Les pertes par recouvrement inverse sont estimées par :

$$W_{S2rr} = k_{rr} U_e Q_{rr} \quad \text{avec } k_{rr} \in [0.5; 1] \tag{B.4}$$

Le recouvrement inverse implique des pertes additionnelles dans le semi-conducteur S_1 , étant donné que le courant de recouvrement inverse est directement issu de ce noeud. Ces dernières sont chiffrées de la manière suivante :

$$W_{S1rr} = \frac{t_{rr}R_{ds}}{2} [(I_{min} + I_{rr})^2 - I_{min}^2] \quad (\text{B.5})$$

B.2 PERTES DE L'INDUCTANCE

L'inductance nécessaire au fonctionnement du convertisseur présente deux postes de pertes principaux : les pertes Joule dans l'enroulement ainsi que les pertes fer dans le matériau magnétique. Étant donné le point de fonctionnement du système (fort courant) et la faible ondulation de courant vue par l'inductance, les pertes dans les enroulements sont prépondérantes par rapport aux pertes fer. Ces dernières sont considérées comme nulles dans le cadre de la modélisation du convertisseur. Les pertes par conduction dans les enroulements sont formulées, pour une période de commutation, de la manière suivante :

$$W_L = TR_L \left(I_{min}^2 + I_{min}\Delta I + \frac{\Delta I^2}{3} \right) \quad (\text{B.6})$$

B.3 PERTES DANS LES ACCUMULATEURS

Les pertes au sein des accumulateurs supercapacitifs ont d'ores et déjà été abordées au chapitre 4. Dans le cadre du modèle de pertes, il est souhaitable de distinguer la différente sollicitation en courant des accumulateurs à l'entrée et à la sortie du convertisseur. En effet, de par la nature de ce dernier, le courant prélevé de l'accumulateur à l'entrée du convertisseur est intermittent (à l'image du courant circulant dans le semi-conducteur du haut), alors que le courant fourni à la sortie, injecté dans l'accumulateur connecté, est continu avec une faible ondulation. De cette manière, pour chaque période de commutation, l'énergie dissipée par chacun des accumulateurs est formulée de la manière suivante :

$$W_{Ain} = DTR_{Ain} \left(I_{min}^2 + I_{min}\Delta I + \frac{\Delta I^2}{3} \right)$$

$$W_{Aout} = TR_{Aout} \left(I_{min}^2 + I_{min}\Delta I + \frac{\Delta I^2}{3} \right)$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] bp (British Petroleum), *BP Statistical Review of World Energy 2010*, 06 2010. (Cité en page 3.)
- [2] World Energy Council, *Energy Policy Scenarios to 2050*, 11 2007. (Cité en page 3.)
- [3] World Energy Council, *2010 Survey of energy resources*, 2010. (Cité en page 3.)
- [4] Agence internationale de l'énergie (OECD/IEA), *Key World Energy Statistics 2011*, 2011. (Cité en page 3, 5, and 163.)
- [5] F. MARECHAL, D. FAVRAT et E. JOCHEM, "Energy in the perspective of the sustainable development: The 2000w society challenge", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 44, no. 3, p. 245 – 262, 2005. (Cité en page 4.)
- [6] H.-H. ROGNER, "Energy resources", dans *Energy for Development* (F. L. TOTH, éd.), vol. 54 dans *Environment and Policy*, p. 149–160, Springer Netherlands, 2012. (Cité en page 4.)
- [7] World Energy Council, *World Energy Perspective: Nuclear Energy One Year After Fukushima*, 2011. (Cité en page 5.)
- [8] European Wind Energy Association, *Pure Power - Wind energy targets for 2020 and 2030*, 07 2011. (Cité en page 6.)
- [9] European Photovoltaic Industry Association, *Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015*, 04 2011. (Cité en page 6.)
- [10] F. GENOESE, M. GENOESE et M. WIETSCHER, "Occurrence of negative prices on the german spot market for electricity and their influence on balancing power markets", dans *Energy Market (EEM)*, 2010 7th International Conference on the European, p. 1–6, june 2010. (Cité en page 6.)
- [11] Y. BRUNET, *Problématiques du stockage d'énergie. Traité EGEM : électronique, génie électrique, microsystèmes: Génie électrique*, Hermes Science Publications, 2009. (Cité en page 9 and 12.)
- [12] H. IBRAHIM, A. ILINCA et J. PERRON, "Energy storage systems — characteristics and comparisons", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, p. 1221 – 1250, 2008. (Cité en page 12 and 64.)
- [13] A.-L. ALLÈGRE, *Méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides*. Thèse de doctorat, Université Lille 1, 2010. (Cité en page 12 and 50.)
- [14] Y. BRUNET, *Energy Storage*. John Wiley & Sons, 2010. (Cité en page 12.)
- [15] B. DESTRAZ, *Assistance énergétique à base de supercondensateurs pour véhicules à propulsion électrique et hybride*. Thèse de doctorat, Lausanne, 2008. doi:10.5075/epfl-thesis-4083. (Cité en page 12 and 102.)

- [16] C. FAHRNI, *Principe d'alimentation par convertisseurs multiniveaux à stockage intégré*. Thèse de doctorat, Lausanne, 2008. doi:10.5075/epfl-thesis-4034. (Cité en page 12.)
- [17] L. GAO, R. A. DOUGAL et S. LIU, "Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 20, p. 236–243, Jan. 2005. (Cité en page 12.)
- [18] E. HECHT, *Physique*. De Boeck Université/ITP, 1999. (Cité en page 18.)
- [19] *Trésor de la Langue Française informatisé (TLFi)*. Analyse et traitement informatique de la langue française (ATILF), Centre national de la recherche scientifique (CNRS), 2004. (Cité en page 18.)
- [20] P. DELARUE, A. BOUSCAYROL et E. SEMAIL, "Generic control method of multi-leg voltage-source-converters for fast practical implementation", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 2, p. 517–526, 2003. (Cité en page 20.)
- [21] A. BOUSCAYROL, B. DAVAT, B. de FERNEL, B. FRANCOIS, J. HAUTIER, F. MEIBODY-TABAR et M. PIETRZAK-DAVID, "Multi-machine multi-converter system for drives: analysis of coupling by a global modeling", dans *Industry Applications Conference*, vol. 3, p. 1474–1481, 2000. (Cité en page 20 and 147.)
- [22] S. M. SCHOENUNG, "Characteristics and technologies for long-vs. short-term energy storage", Rap. tech. SAND2001-0765, Sandia National Laboratories, 03 2001. (Cité en page 25 and 32.)
- [23] D. RAGONE, "Review of battery systems for electrically powered vehicles", *Society of Automotive Engineers, transactions of*, vol. 77, p. 131, 1968. (Cité en page 30 and 31.)
- [24] T. CHRISTEN et M. W. CARLEN, "Theory of ragone plots", *Journal of Power Sources*, vol. 91, no. 2, p. 210 – 216, 2000. (Cité en page 30, 32, and 36.)
- [25] H. CHEN, T. N. CONG, W. YANG, C. TAN, Y. LI et Y. DING, "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, p. 291 – 312, 2009. (Cité en page 31.)
- [26] BOMBARDIER, "Mitrac hybrid". Technical white paper, 2009. (Cité en page 51.)
- [27] L. GAO, R. DOUGAL et S. LIU, "Active power sharing in hybrid battery/capacitor power sources", dans *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03. Eighteenth Annual IEEE*, vol. 1, p. 497–503 vol.1, Feb. 2003. (Cité en page 52.)
- [28] K. CHAU et Y. WONG, "Overview of power management in hybrid electric vehicles", *Energy Conversion and Management*, vol. 43, no. 15, p. 1953 – 1968, 2002. (Cité en page 54.)
- [29] A. BRAHMA, Y. GUEZENNEC et G. RIZZONI, "Optimal energy management in series hybrid electric vehicles", dans *American Control Conference*, vol. 1, p. 60–64 vol.1, Sep 2000. (Cité en page 54.)
- [30] S. LUKIC et A. EMADI, "Effects of drivetrain hybridization on fuel economy and dynamic performance of parallel hybrid electric vehicles", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 53, p. 385 – 389, 03 2004. (Cité en page 54.)

- [31] A. RUFER, P. BARRADE et B. DESTRAZ, "Hybrid vehicle in railways applications: supercapacitive energy storage for diesel-electric locomotives", dans *Vehicular Power and Propulsion Symposium*, 2004. (Cité en page 55.)
- [32] C. FAHRNI, A. RUFER, F. BORDRY et J. P. BURNET, "A novel 60 MW pulsed power system based on capacitive energy storage for particle accelerators", dans *EPE 2007 : 12th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007. (Cité en page 55.)
- [33] W. GAO, "Performance comparison of a fuel cell-battery hybrid powertrain and a fuel cell-ultracapacitor hybrid powertrain", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 54, p. 846–855, May 2005. (Cité en page 56.)
- [34] P. RIBEIRO, B. JOHNSON, M. CROW, A. ARSOY et Y. LIU, "Energy storage systems for advanced power applications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, p. 1744–1756, Dec 2001. (Cité en page 56.)
- [35] H. LIU, Z. WANG, J. CHENG et D. MALY, "Improvement on the cold cranking capacity of commercial vehicle by using supercapacitor and lead-acid battery hybrid", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 58, p. 1097–1105, march 2009. (Cité en page 56.)
- [36] B. K. SOVACOOOL et R. F. HIRSH, "Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (phevs) and a vehicle-to-grid (v2g) transition", *Energy Policy*, vol. 37, no. 3, p. 1095 – 1103, 2009. (Cité en page 56.)
- [37] C. HOLLAND, J. WEIDNER, R. DOUGAL et R. WHITE, "Experimental characterization of hybrid power systems under pulse current loads", *Journal of Power Sources*, vol. 109, no. 1, p. 32 – 37, 2002. (Cité en page 58.)
- [38] R. DOUGAL, S. LIU et R. WHITE, "Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids", *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, vol. 25, p. 120–131, Mar 2002. (Cité en page 58.)
- [39] P. BARRADE et A. RUFER, "High-Power Fast Energy Exchange between Storage Systems : Supercapacitors as energy buffer in transportation systems", dans *EVS-18 : The 18th International Vehicle Symposium*, 2001. (Cité en page 76.)
- [40] P. BARRADE et A. RUFER, "Power Smoothing and High-Power Fast Energy Exchange Between Storage Systems", dans *Ansoft's "Inspiring Next" Electromechanical Users' Workshop*, 2001. (Cité en page 76.)
- [41] P. BARRADE, *Electronique de puissance : Méthodologie et convertisseurs élémentaires*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2006. (Cité en page 76.)
- [42] A. RUFER, P. BARRADE, D. HOTELLIER et S. HAUSER, "Sequential Supply for Electrical Transportation Vehicles: Properties of the fast energy transfer between supercapacitive tanks", *Journal of circuits, systems and computers, World Scientific*, vol. 13, no. 4, p. 941–955, 2004. (Cité en page 76.)
- [43] S. LEMOFOUET-GATSI, *Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors*. Thèse de doctorat, Lausanne, 2006. doi:10.5075/epfl-thesis-3628. (Cité en page 102 and 132.)

- [44] S. LEMOFOUET et A. RUFER, "A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking (mept)", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, p. 1105–1115, June 2006. (Cité en page 102 and 124.)
- [45] P. BARRADE, S. DELALAY et A. RUFER, "Direct connection of supercapacitors to photovoltaic panels with on-off maximum power point tracking", *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 3, p. 283–294, april 2012. (Cité en page 126, 128, 132, and 165.)
- [46] J.-P. HAUTIER et P.-J. BARRE, "The causal ordering graph a tool for system modelling and control law synthesis", *Studies in informatics and control*, vol. 13, no. 4, p. 265–284, 2004. (Cité en page 148.)
- [47] S. LINDER, *Power semiconductors*. EPFL Press, 2006. (Cité en page 152.)

LISTE DES SYMBOLES

η_{a1}	Rendement de l'alimentation mono-étagée
η_{a2}	Rendement de l'alimentation bi-étagée
η_{eq}	Rendement de la phase d'égalisation
η_{fc}	Rendement de la phase de charge rapide
η_g	Rendement global de la charge
κ_{ac}	Facteur de pertes de l'accumulateur
κ_c	Facteur de pertes du convertisseur
C_s	Capacité du supercondensateur
D	Rapport cyclique d'enclenchement
D_A	Rapport cyclique de fonctionnement de l'étage A
D_B	Rapport cyclique de fonctionnement de l'étage B
D_{on}	Rapport cyclique de fonctionnement
f_i	Fréquence du comportement intermittent
I_l	Courant fourni à la charge — modèle d'accumulateur
I_{sc}	Courant du supercondensateur
k_{fc}	Déficit en énergie
k_{sys}	Coefficient d'amplification de puissance
n	Nombre de charges et décharges de l'étage A durant T_i
P	Puissance
P_A	Puissance échangée entre les étages A et B
P_L	Puissance consommée par la charge
P_p	Pertes dans la résistance parallèle — modèle d'accumulateur
P_s	Pertes dans la résistance série — modèle d'accumulateur
P_{conv}	Puissance à l'entrée du convertisseur
P_{in}	Puissance fournie par la source
P_{L1}	Puissance consommée par la charge durant l'intervalle $0 \leq t < (1 - D)T_i$
P_{L2}	Puissance consommée par la charge durant l'intervalle $(1 - D)T_i \leq t < T_i$
P_{Lc0}	Pertes de fonctionnement du convertisseur
P_{Lconv}	Pertes totales du convertisseur
P_m	Puissance moyenne consommée par la charge
P_{on}	Puissance consommée par la charge lorsqu'elle est enclenchée

R_l	Résistance équivalente de charge — modèle d'accumulateur
R_p	Résistance parallèle — modèle d'accumulateur
R_s	Résistance série — modèle d'accumulateur
R_s	Résistance série
T_A	Période de fonctionnement de l'étage A
T_B	Période de fonctionnement de l'étage B
T_i	Période du comportement intermittent
t_{fc}	Durée de la charge rapide
t_{life}	Autonomie de l'accumulateur
t_{on}	Durée durant laquelle la charge est enclenchée
U_0	Tension à vide — modèle d'accumulateur
U_c	Tension de la cellule capacitive du supercondensateur
U_{CSmax}	Tension nominale du supercondensateur
U_{rs}	Chute de tension résistive du supercondensateur
U_{sc}	Tension aux bornes du supercondensateur
W	Travail
W_0	Energie stockée dans l'accumulateur
W_{acCh}	Energie stockée dans l'accumulateur
W_{acDis}	Energie extraite de l'accumulateur
W_{eq}	Energie stockée durant la phase d'égalisation
W_{fc}	Energie stockée durant la phase de charge rapide
W_{Leq}	Energie dissipée durant la phase d'égalisation
W_{Lfc}	Energie dissipée durant la phase de charge rapide
W_{utileX}	Energie extractible de l'accumulateur pour une charge du modèle X
W_{utile}	Energie utile dans l'accumulateur

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Consommation mondiale d'énergie de 1971 à 2009 en Mtep [4] . . .	3
Figure 1.2	Sortie délicate du nucléaire, par Chappatte	4
Figure 1.3	Production mondiale d'électricité de 1971 à 2009 en TWh [4] . . .	5
Figure 1.4	Trois composantes principales d'un réseau électrique	6
Figure 1.5	Profils de consommation d'électricité en Suisse (données Swiss-grid)	7
Figure 1.6	Profils de production de sources renouvelables (a) solaire photovoltaïque (données Romande Energie, EPFL/LESO) (b) éolienne (données Australian Energy Market Operator)	8
Figure 1.7	Classification des accumulateurs d'énergie	10
Figure 1.8	Formes de stockage d'énergie	11
Figure 1.9	Comparaison de la chaîne de traction d'un véhicule standard (haut) à celle d'un véhicule hybride (bas)	12
Figure 1.10	Comparaison des profils de puissance d'un véhicule standard (trait plein) et d'un véhicule hybride (pointillés)	13
Figure 2.1	Exemples de représentations simplifiées d'un véhicule à moteur	21
Figure 2.2	Remplacement en REM d'éléments accumulateurs d'énergie (représentations du centre et de droite) par une source d'énergie (à gauche)	22
Figure 2.3	Réponses en puissance d'une source quasi-immédiate (noir), non-immédiate (vert) et différée (rouge)	25
Figure 2.4	Connexion de sources dont les flux d'énergie peuvent être qualifiés de (a) entrant - mixte contraint et (b) sortant - mixte contraint	27
Figure 2.5	Dimensionnement de source en fonction des propriétés de la charge	28
Figure 2.6	Charges usuelles dont le comportement est modélisé	29
Figure 2.7	Contraintes de dimensionnement dans le plan énergie/puissance	31
Figure 2.8	Comparaison des types d'accumulateurs via une représentation de Ragone	32
Figure 2.9	Représentation de Ragone modifiée du comportement d'un accumulateur type	33
Figure 2.10	Modèle générique d'accumulateur	34
Figure 2.11	Comportement du modèle dans la représentation de Ragone modifiée	35
Figure 2.12	Modèle d'accumulateurs type puissance et énergie	35
Figure 2.13	Energie disponible pour une charge intermittente en fonction du rapport cyclique	37
Figure 2.14	Energie disponible pour une charge unidirectionnelle à paliers $P_{L1} = 0.1$	38
Figure 2.15	Energie disponible pour une charge bidirectionnelle	40
Figure 2.16	Dimensionnement d'un accumulateur réel	41
Figure 2.17	Sur-dimensionnement nécessaire d'un accumulateur sollicité de façon intermittente	42
Figure 3.1	Représentation d'un système de stockage hybride	49
Figure 3.2	Possibilités de connexion de sources en fonction de leurs propriétés au sein d'un système hybride comprenant 3 sources	51

Figure 3.3	Différentes possibilités d'interconnexion d'éléments	53
Figure 3.4	Différentes possibilités d'interconnexion de 3 sources	53
Figure 3.5	Fonctionnalité énergétique atteinte par la réversibilité du flux d'énergie	57
Figure 3.6	Caractéristique recherchée pour l'accumulateur hybride	58
Figure 3.7	Répartition de la sollicitation en puissance entre les sources	59
Figure 3.8	Caractéristiques affichées par les associations passives et actives d'accumulateurs alimentant une charge intermittente ($D = 0.1$) . .	60
Figure 4.1	Densité énergétique et de puissance proposée par certains fabri- cants d'accumulateurs électrochimiques	64
Figure 4.2	Accumulateur électrochimique à remplacer (53x33x7mm)	65
Figure 4.3	Caractéristiques des accumulateurs et puissances en jeu	68
Figure 4.4	REM de l'alimentation de l'application par les deux accumula- teurs d'énergie	69
Figure 4.5	Représentation du système de charge lente	70
Figure 4.6	Modèle simplifié du supercondensateur	71
Figure 4.7	Charge rapide du supercondensateur	72
Figure 4.8	Répartition de la transmission de l'énergie par phase de charge . .	73
Figure 4.9	Répartition de la transmission de l'énergie par phase de charge . .	74
Figure 4.10	Principe de fonctionnement de la charge rapide par alimentation directe	75
Figure 4.11	Principe de la charge rapide par étage tampon	77
Figure 4.12	Principe de la charge rapide - détail des courants pour chaque accumulateur	78
Figure 4.13	Représentation de la chaîne de charge rapide	78
Figure 4.14	Topologie de conversion retenue pour la charge rapide	79
Figure 4.15	Charge rapide sous conditions idéalisées	80
Figure 4.16	Pertes occasionnées par la charge rapide	81
Figure 4.17	Cartographie partielle du rendement du convertisseur	82
Figure 4.18	Rendement global du processus de charge en fonction de courant imposé à l'accumulateur côté application et répartition des pertes	83
Figure 4.19	REM et schéma électrique simplifié du système	84
Figure 4.20	REM et SCI du système	86
Figure 4.21	Caractéristiques de l'accumulateur lithium-ion original	88
Figure 4.22	Capacité minimale nécessaire en fonction du temps de charge rapide	89
Figure 4.23	Capacité minimale nécessaire au niveau du chargeur	91
Figure 4.24	Convertisseur de charge rapide : chargeur (à gauche) et applica- tion (à droite)	93
Figure 4.25	Inductance planaire à fort courant	94
Figure 4.26	Rendement du convertisseur de charge rapide	94
Figure 4.27	Rendement global de la phase de charge rapide	95
Figure 4.28	Prototype de charge rapide et alimentation hybride d'un sys- tème audio sans fil	97
Figure 5.1	Principe de fonctionnement intermittent tout-ou-rien	103
Figure 5.2	Principe de l'alimentation directe	103
Figure 5.3	Rendement de l'alimentation directe	104
Figure 5.4	Principe de l'alimentation filtrée	105
Figure 5.5	Principe de l'alimentation par stockage intermédiaire	106
Figure 5.6	Fonctionnement de l'alimentation par stockage intermédiaire mono- étagé	108

Figure 5.7	Rendement de l'alimentation par stockage intermédiaire	111
Figure 5.8	Représentation du rendement de l'alimentation mono-étagée . . .	112
Figure 5.9	Fonctionnement de l'alimentation par stockage intermédiaire bi-étagé	113
Figure 5.10	Phases de fonctionnement de l'alimentation par stockage intermédiaire bi-étagé	114
Figure 5.11	Relation entre les rapports cycliques de chaque sous-système . . .	115
Figure 5.12	Rendement de l'alimentation bi-étagée	117
Figure 5.13	Rendement de l'alimentation pour $D_{on} = 0.01$ - pertes convertisseur	118
Figure 6.1	Système de stockage hydropneumatique, conversion et charge . . .	125
Figure 6.2	Puissance électrique requise en fonction de la pression et de la vitesse de rotation	126
Figure 6.3	Puissance extractible de la source d'énergie selon l'heure (29/07/2009) [45]	126
Figure 6.4	MPPT photovoltaïque : système classique (a), alternative sans convertisseur (b)	127
Figure 6.5	MPPT par oscillation autour du point de puissance maximale . . .	128
Figure 6.6	Représentation schématique du système bi-étagé d'alimentation . .	129
Figure 6.7	Représentation des puissances en jeu et des caractéristiques de la source	130
Figure 6.8	REM et SMC du système	131
Figure 6.9	Rendement de la pompe hydraulique en fonction de la pression et de la vitesse de rotation (données fabricant)	133
Figure 6.10	Système bi-étagé d'alimentation utilisé pour la partie expérimentale	134
Figure 6.11	Mesure du rendement de la conversion électrique — mécanique	134
Figure 6.12	Mesure du fonctionnement du système	135
Figure 7.1	Méthode de dimensionnement d'un système de charge rapide . . .	141
Figure 7.2	Connaître le système pour satisfaire la demande énergétique . . .	143
Figure A.1	Définition explicite du partage d'énergie	148
Figure B.1	Commutation des semi-conducteurs, instants-clé	153

LISTE DES TABLEAUX

Table 4.1	Cahier des charges du système hybride	65
Table 4.2	Comparaison de solutions de conversion pour la charge rapide .	78
Table 4.3	Algorithme pour la simulation de la charge	90
Table 5.1	Classification des charges intermittentes	107
Table 6.1	Cahier des charges du système considéré	124
Table A.1	Principaux blocs de la REM	149
Table A.2	Principaux blocs d'inversion de la REM	150

Simon Delalay

Ingénieur en énergie électrique

✉ simon@delalay.net

Né le 5 janvier 1985

Nationalité : Suisse

Formation

- 03.2009-06.2013 **Etudes doctorales en sciences de l'énergie**, *Laboratoire d'électronique industrielle*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
Titre de la thèse : Etude systémique pour l'alimentation hybride — application aux systèmes intermittents
- 09.2007-02.2009 **Master en génie électrique et électronique**, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
Travail de diplôme : Stockeur hybride
- 09.2004-07.2007 **Bachelor en génie électrique et électronique**, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Expérience

- 03.2009-06.2013 **Assistant-Doctorant**, *Laboratoire d'électronique industrielle*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Conception et réalisation d'un accumulateur hybride à recharge rapide**
- Conception, dimensionnement et réalisation du système
 - Conception et réalisation mécanique et de différents circuits imprimés
 - Définition et implémentation temps réel des lois de contrôle
 - Réalisation et mise en service d'un prototype de convertisseur 6V, 40A
 - Rédaction d'articles scientifiques et participation aux conférences correspondantes
 - Collaboration avec le partenaire industriel et transfert technologique
- Création d'une plateforme numérique sécurisée de contrôle pour convertisseurs d'électronique de puissance dédiée au prototypage rapide**
- Définition des concepts-clé; conception électronique et mécanique
 - Gestion du développement du projet
 - Programmation d'un système d'exploitation temps réel (C, assembleur)
 - Programmation de systèmes logiques complexes (VHDL)
 - Mise en oeuvre de prototypes, tests de fonctionnalité
- Conception et réalisation système d'adaptation de puissance à stockage intermédiaire**
- Conception, dimensionnement et réalisation du système
 - Conception et réalisation des différents circuits imprimés
 - Définition et implémentation temps réel des lois de contrôle
 - Réalisation et mise en service d'un prototype
 - Rédaction d'articles scientifiques et participation aux conférences correspondantes
 - Collaboration avec le partenaire industriel et transfert technologique
- Enseignement de l'électronique industrielle**
- Responsable de projets aux étudiants de cycles *Bachelor* et *Master* de génie électrique
 - Assistant d'enseignement pour des cours de niveaux *Bachelor* et *Master*

- 07.2007-09-2007 **Stagiaire**, *SBB Infrastruktur*, Zollikofen.
- Analyse de la charge du réseau 16^{2/3}
 - Prédiction de charge en cas d'évènements spéciaux et imprévus
 - Etude d'impact de la pré-chauffe des véhicules sur la consommation d'énergie

Formation continue

- 2011 Prévention face au risque suicidaire chez ses collaborateurs
2010 Introduction à la comptabilité et à la finance

Langues pratiquées

Français	Langue maternelle
Anglais	Courant : niveau C1
Allemand	Courant : niveau B2
Italien	Basique : niveau A2

Publications

N. Cherix, **S. Delalay**, P. Barrade, C. Rod, A. Rufer. *Fail-safe Modular Control Platform for Power Electronic Applications in R&D Environments*, accepté pour publication à EPE 2013 : 16th European Conference on Power Electronics and Applications, Lille, France, septembre 2013.

S. Delalay, P. Barrade, A. Rufer. *Design Considerations for the Fast Charge of Supercapacitors in the Frame of Low Voltage Applications*, EPE 2011 : 14th European Conference on Power Electronics and Applications, Birmingham, UK, septembre 2011.

P. Barrade, **S. Delalay**, A. Rufer. *Transfert séquentiel d'énergie à adaptation de puissance par supercondensateurs*, EPF 2012 : 14ème édition de la Conférence Electronique de Puissance du Futur, Bordeaux, France, juillet 2012.

P. Barrade, **S. Delalay**, A. Rufer. *Direct Connection of Supercapacitors to Photovoltaic Panels With On-Off Maximum Power Point Tracking*, dans IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 3, num. 2, p. 283 - 294, 2012.

S. Delalay, P. Barrade, A. Rufer. *Efficiency Considerations for the Fast Charge of Supercapacitors in the Frame of Low Voltage Applications*, ESSCAP 2010 : 4th European Symposium on Supercapacitors & Applications, Bordeaux, France, octobre 2010.