



HAL
open science

Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique

Nathalie Devillers

► **To cite this version:**

Nathalie Devillers. Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique. Autre. Université de Franche-Comté, 2012. Français. NNT : 2012BESA2003 . tel-00838733

HAL Id: tel-00838733

<https://theses.hal.science/tel-00838733>

Submitted on 26 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SPIM

Thèse de Doctorat

UFC

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique

■ **NATHALIE DEVILLERS**

SPIM

Thèse de Doctorat

UFC

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Thèse présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Franche-Comté

Spécialité : **Génie Electrique**

par Nathalie DEVILLERS, Ingénieure ENSIEG

CARACTERISATION ET MODELISATION DE COMPOSANTS DE STOCKAGE ELECTROCHIMIQUE ET ELECTROSTATIQUE

Jury :

| | | |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Monsieur Pascal VENET | Professeur des Universités | Rapporteur, Président |
| Monsieur Serge PELISSIER | Chargé de Recherche, HDR | Rapporteur |
| Monsieur Xavier ROBOAM | Directeur de Recherche CNRS | Examineur |
| Madame Marie-Laure GROJO | Ingénieur | Examineur |
| Madame Marie-Cécile PERA | Professeur des Universités | Examineur |
| Monsieur Alain BERTHON | Professeur des Universités | Examineur |
| Monsieur Frédéric GUSTIN | Maître de Conférences | Examineur |
| Monsieur Daniel HISSEL | Professeur des Universités | Examineur |

Thèse préparée sous la direction du Professeur Marie-Cécile Péra
à l'Institut FEMTO-ST / Département Energie / Unité Mixte de Recherche CNRS 6174

RESUME

La gestion d'un réseau électrique embarqué nécessite l'introduction de systèmes de stockage de l'énergie pour assurer la stabilité et la qualité du réseau et garantir la disponibilité de l'énergie. Dans les avions conventionnels, les éléments de stockage de l'énergie sont sollicités particulièrement pour l'aide au démarrage en début de mission ou le secours électrique en cas de panne. Depuis quelques années, on s'oriente vers des avions « plus électriques » pour des raisons de flexibilité d'utilisation et de réduction des coûts d'utilisation, ce qui implique une consommation électrique plus élevée et un changement de périmètre fonctionnel pour les systèmes de stockage. De plus, dans le domaine aéronautique, l'optimisation du rendement énergétique global, la réduction des masses embarquées et la nécessité de répondre aux besoins énergétiques croissants conduisent à développer de nouvelles technologies et méthodes pour générer l'énergie électrique à bord, pour la distribuer, la convertir et la stocker.

Pour étudier le réseau de bord d'un avion, des simulations numériques de son fonctionnement sont réalisées grâce à une modélisation des diverses sources et des consommateurs qui y sont connectés. Dans cette thèse, des éléments de stockage de l'énergie sont caractérisés dans l'optique d'être modélisés.

Un état de l'art des différents moyens de stocker l'énergie électrique dans une application embarquée est présenté en premier lieu. Parmi ces différents systèmes de stockage, sont retenus pour cette étude les supercondensateurs et les accumulateurs électrochimiques Lithium-ion polymère, qui sont considérés respectivement comme des sources de puissance et d'énergie, à l'échelle de l'application.

Ces moyens de stockage sont caractérisés en employant deux méthodes que sont la chronopotentiométrie à courant constant et la spectrométrie d'impédance électrochimique. Les caractérisations sont effectuées dans des conditions expérimentales, définissant le domaine de validité des modèles, en cohérence avec les contraintes de l'application finale.

A partir de ces caractérisations, différents modèles sont développés en fonction de leur utilisation : des modèles simples, fonctionnels et suffisants pour la gestion globale d'énergie et des modèles dynamiques, comportementaux et nécessaires pour l'analyse de la qualité du réseau. Ces modèles sont ensuite validés sur des profils de charge élaborés à partir de profils de mission de l'avion.

Pour disposer d'un système de stockage performant et en adéquation avec les besoins énergétiques de l'avion, une méthode de dimensionnement est proposée, associant des composants de stockage dont les caractéristiques énergétiques sont complémentaires. Une gestion fréquentielle des sources est évaluée et mise en œuvre de manière à déterminer la répartition de l'énergie entre les sources qui permette une minimisation de la masse du système de stockage.

Mots-clés :

Systèmes de stockage de l'énergie électrique, Accumulateurs électrochimiques Lithium-ion polymère, Supercondensateurs, Hybridation/association de moyens de stockage, Gestion fréquentielle de l'énergie, Dimensionnement d'un système de stockage

ABSTRACT

The management of an embedded electrical network requires the use of electrical storage systems in order to warranty the network stability and quality, and the energy availability. In conventional aircrafts, electrical storage systems are helpful as support to engine start at the mission beginning or as electrical emergency back-up. For a couple of years, aircrafts have moved on “more electrical” aircrafts due to the flexibility of use of electrical energy and due to the decrease of its operating cost. This evolution implies a higher consumption of electrical energy and a change of functional scope for storage systems. Moreover, in aeronautics, the optimization of the global energetic efficiency, the reduction of the embedded weight and the need to meet the growing energetic requirements lead to develop new technologies and methods to generate electrical energy, to distribute it, to convert it and to store it aboard.

In order to study the aircraft network, numerical simulations of its operation are carried out thanks to a modeling of various sources and consumers connected to the electrical network. In this thesis, energy storage systems are characterized with a view to be modeled.

A state of the art of different electrical energy storage systems for an embedded application is firstly presented. Among these varied storage systems, ultracapacitors and Lithium-ion polymer secondary batteries are studied. These components are considered respectively as power and energy sources, in regards to the application scale.

These storage systems are characterized by using two methods which are chronopotentiometry at constant current and electrochemical impedance spectrometry. Characterizations are carried out in experimental conditions which define the validity area of modeling, in relation with the application constraints.

From these characterizations, different models are developed according to their future use: simple models, which are functional and sufficient for the global energy management, and dynamic models, which are behavioral and necessary for the analysis of the network quality. Then, these models are validated thanks to load profiles, defined from aircraft mission profiles.

Finally, to dispose of an efficient storage system that meets the energetic requirements of the aircraft, a sizing method is suggested by combining storage systems, which are complementary according to their energetic characteristics. An energy management based on frequency approach is evaluated and implemented in order to determine the energy balancing between the sources, so that the storage system weight is minimizing.

Key-words:

Electrical Energy Storage Systems, Lithium-ion polymer Secondary batteries, Ultracapacitors, Hybridization/association of storage systems, Energy management based on frequency approach, Sizing of storage systems

AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés à l'institut FEMTO-ST (Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Techniques), qui est une Unité Mixte de Recherche (UMR 6174) associée au CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et rattachée à l'Université de Franche-Comté (UFC), à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et de Microtechniques (ENSMM) et à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). La recherche au sein de l'institut est menée dans les domaines des sciences de l'ingénieur et des sciences de l'information, en cohérence avec la tradition industrielle de la région Franche-Comté. Le laboratoire FEMTO-ST compte sept départements de recherche, dont le département Energie, localisé à Belfort, au sein duquel j'ai effectué mon travail de recherche.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet porté par la DGA (Direction Générale de l'Armement). Pour des raisons de confidentialité, un certain nombre d'éléments relatifs à l'application industrielle ont été supprimés ou reformulés dans cette présente version.

Je souhaite remercier, tout d'abord, la DGA pour le financement de ce programme de recherche, et particulièrement les membres de la division IP (Ingénierie des Projets) à Bagneux : Michel Amiet et Mathieu Bervas, et de la division TA (Techniques Aéronautiques) à Toulouse : Cécile Dorgan, Nicolas Eche et Christophe Finestre.

Je tiens ensuite à remercier sincèrement :

Monsieur Pascal Venet, Professeur des Universités à l'Université Claude Bernard, Lyon 1, rattaché au laboratoire AMPERE, pour avoir assuré les fonctions de président du jury et de rapporteur avec attention et justesse ;

Monsieur Serge Pélissier, Chargé de Recherche, Habilité à Diriger des Recherches, au Laboratoire Transports et Environnement (LTE) de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) à Bron, pour avoir rapporté ma thèse avec intérêt et rigueur ;

Monsieur Xavier Roboam, Directeur de Recherche CNRS au laboratoire LAPLACE de Toulouse, pour avoir accepté d'examiner mes travaux et pour ses questions pertinentes ;

Madame Marie-Laure Grojo, Ingénieure en charge du Projet pour un des partenaires industriels, pour cette collaboration enrichissante pendant ces années.

Mes remerciements s'adressent aussi à toutes les personnes impliquées dans ce projet et desquelles j'ai beaucoup appris scientifiquement et techniquement : Gilles Bezes, Ghislain Carina, Marc Gazzino, Michel Jamot, Tanguy Jullien, Raphaël Vannunen, Didier Ferrer, Henri Foch, Aymeric Lacoste, Bernard Mangin, Fabien Quesada et Christian Saubion.

Un merci particulier à Marie-Cécile Péra, Professeur des Universités à l'Université de Franche-Comté, rattachée à l'institut FEMTO-ST, pour m'avoir encouragée à préparer cette thèse, pour l'encadrement de ma recherche et pour la confiance qu'elle m'a témoignée tout au long de ce projet.

Je remercie aussi chaleureusement :

Frédéric Gustin, Maître de Conférences à l'Université de Franche-Comté, chercheur au laboratoire FEMTO-ST pour avoir suivi mon travail et pour m'avoir aidée dans la partie expérimentale ;

Alain Berthon, Professeur des Universités à l'Université de Franche-Comté, pour avoir relu ce mémoire et pour avoir été mon professeur à l'IUT GEII de Belfort (au siècle dernier !).

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Professeur Alain Berthon et au Professeur Jean-Marie Kauffmann qui sont à la genèse du Projet et qui ont grandement contribué au développement de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche dans le Nord Franche-Comté.

Je remercie infiniment :

Daniel Hissel, Professeur des Universités à l'Université de Franche-Comté, pour avoir examiné mes travaux et pour m'avoir accueillie dans l'équipe SH-PAC (Systèmes Hybrides et Piles A Combustible) du département Energie de FEMTO-ST et au sein de la Fédération de Recherche FC-LAB ;

Daniel Bienaimé, Docteur de l'Université de Franche-Comté, pour tout le travail accompli dans la bonne humeur durant ces trois années ;

Joseba Asensio-Sauto, doctorant, pour le travail efficace et en équipe sur le projet ;

Samir Jemeï, Maître de Conférences à l'Université de Franche-Comté, pour son aide précieuse dans la réalisation du banc de test et pour m'avoir confié des vacances à l'UFR STGI (sans oublier le partage momentané du bureau).

Je remercie également :

Les membres de l'Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur et Microtechniques et son directeur Philippe Lutz ;

Les doctorants du laboratoire pour leur bienveillance à mon égard : Charly, Destiny, François, Kun, Mona, Raïssa, Rania, Raffaele, Rosa-Elvira, Simon, Vincent et Zhixue ; particulièrement Jérôme Baert pour la modernisation du banc de test et les docteurs Javier Solano-Martinez et Kréhi-Serge Agbli pour les vacances partagées (TP REM) ;

Les collègues du département Energie, au parc technologique et sur le Techn'hom, de FC-LAB, de l'UFC et de l'UTBM, enseignants-chercheurs, chercheurs, ingénieurs, techniciens, personnels administratifs et supports techniques ; spécialement Isabelle Christen, Bruno Riccio, Laurence Mary, Sabine Lantz-Crelier, Xavier François, Karine Diez, Florence Antoine, Laurent Callegari et Bruno Chognard ;

Daniel Depernet et Christophe Espanet pour m'avoir accueillie dans leur bureau (ou devrais-je dire dans l'enceinte climatique qui leur sert de bureau... ce doit être pour étudier le vieillissement accéléré des chercheurs, le critère retenu étant la température) ; merci Daniel pour les discussions intéressantes et les conseils avisés.

Enfin, je voudrais exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont suivi de près ou de loin mon retour à la vie universitaire après une parenthèse industrielle de plusieurs années.

Un grand MERCI à ma famille et à mes amis qui m'ont supportée (dans tous les sens du terme) pendant la préparation de cette thèse.

Je remercie mes parents pour leur soutien inconditionnel et leur dédie ce mémoire.

*« La connaissance s'acquiert par l'expérience,
tout le reste n'est que de l'information. »*

Albert Einstein (1879-1955)

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| I. Chapitre 1 : Le stockage de l'énergie électrique | 5 |
| 1 Caractéristiques des éléments de stockage | 5 |
| 2 Les éléments de stockage comme des sources de puissance | 8 |
| 2.1 Condensateurs..... | 8 |
| 2.1.1 Principe de fonctionnement | 8 |
| 2.1.2 Technologies | 9 |
| 2.1.3 Grandeurs caractéristiques..... | 9 |
| 2.1.4 Propriétés..... | 10 |
| 2.1.5 Applications | 11 |
| 2.2 Supercondensateurs..... | 11 |
| 2.2.1 Origine / Historique | 11 |
| 2.2.2 Principe de fonctionnement | 11 |
| 2.2.3 Technologies | 12 |
| 2.2.4 Grandeurs caractéristiques..... | 13 |
| 2.2.5 Propriétés..... | 13 |
| 2.2.6 Applications | 14 |
| 2.3 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) | 15 |
| 2.3.1 Origine / Historique | 15 |
| 2.3.2 Principe de fonctionnement | 15 |
| 2.3.3 Technologies | 16 |
| 2.3.4 Grandeurs caractéristiques..... | 16 |
| 2.3.5 Propriétés..... | 16 |
| 2.3.6 Applications | 17 |
| 2.4 Volants d'inertie | 17 |
| 2.4.1 Origine / Historique | 17 |
| 2.4.2 Principe de fonctionnement | 18 |
| 2.4.3 Technologies | 18 |
| 2.4.4 Grandeurs caractéristiques..... | 19 |
| 2.4.5 Propriétés..... | 19 |
| 2.4.6 Applications | 20 |
| 3 Les éléments de stockage comme des sources d'énergie..... | 21 |
| 3.1 Accumulateurs électrochimiques | 21 |
| 3.1.1 Principe de fonctionnement | 21 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 3.1.2 | Grandeurs caractéristiques..... | 22 |
| 3.1.3 | Technologies | 24 |
| 3.1.3.1 | Accumulateurs au plomb | 24 |
| 3.1.3.2 | Accumulateurs au nickel | 25 |
| 3.1.3.2.1 | Accumulateur Nickel-Cadmium | 25 |
| 3.1.3.2.2 | Accumulateur Nickel Métal Hydrure | 26 |
| 3.1.3.2.3 | Accumulateur Nickel – Zinc..... | 27 |
| 3.1.3.3 | Accumulateurs au lithium | 28 |
| 3.1.3.3.1 | Accumulateur Lithium-métallique | 28 |
| 3.1.3.3.2 | Accumulateur Lithium-ion à électrolyte liquide | 29 |
| 3.1.3.3.3 | Accumulateur Lithium-métal Polymère | 32 |
| 3.1.3.3.4 | Accumulateur Lithium-ion Polymère | 33 |
| 3.1.4 | Éléments de comparaison entre accumulateurs électrochimiques..... | 34 |
| 3.2 | Stockage par la filière hydrogène | 35 |
| 3.2.1 | Electrolyseur | 35 |
| 3.2.2 | Le stockage de l’hydrogène | 36 |
| 3.2.3 | Pile à combustible..... | 37 |
| 3.2.4 | Accumulateur à combustible | 37 |
| 4 | Comparaison des moyens de stockage | 38 |
| 5 | Les moyens de stockage de l’énergie dans les avions..... | 40 |
| 5.1 | Les avions conventionnels | 41 |
| 5.1.1 | L’énergie électrique dans les avions conventionnels..... | 41 |
| 5.1.2 | Le stockage de l’énergie électrique dans les avions conventionnels..... | 42 |
| 5.2 | Les avions « plus électriques » | 42 |
| 5.2.1 | L’énergie électrique dans les avions « plus électriques » | 42 |
| 5.2.2 | Le stockage de l’énergie électrique dans les avions « plus électriques » | 43 |
| 5.3 | Les hélicoptères | 43 |
| 5.3.1 | L’énergie électrique dans les hélicoptères..... | 43 |
| 5.3.2 | Le stockage de l’énergie électrique dans les hélicoptères..... | 44 |
| 6 | Les moyens de stockage de l’énergie pour le Projet..... | 45 |
| | Préambule aux chapitres 2 et 3 | 47 |
| II. | Chapitre 2 : Caractérisation et modélisation des accumulateurs électrochimiques..... | 49 |
| 1 | Equipements de test et éléments testés..... | 49 |
| 1.1 | Banc de test des accumulateurs..... | 49 |
| 1.1.1 | Banc de puissance..... | 50 |
| 1.1.2 | Superviseur | 50 |
| 1.1.3 | Impédancemètre | 51 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.2 | Accumulateurs testés | 52 |
| 2 | Caractérisation pour la détermination de la capacité..... | 53 |
| 2.1 | Procédure de détermination de la capacité | 54 |
| 2.2 | Résultats de la caractérisation..... | 55 |
| 3 | Caractérisation pour la détermination du modèle quasi-statique..... | 56 |
| 3.1 | Présentation du modèle quasi-statique | 56 |
| 3.2 | Procédure de caractérisation | 56 |
| 3.3 | Méthode d'identification des paramètres du modèle quasi-statique..... | 57 |
| 3.4 | Résultats de la caractérisation et modélisation | 57 |
| 3.4.1 | Caractérisation expérimentale et identification des paramètres du modèle..... | 57 |
| 3.4.2 | Analyse complémentaire des résultats expérimentaux..... | 61 |
| 3.4.3 | Simulation du modèle quasi-statique | 63 |
| 4 | Caractérisation pour la détermination du modèle dynamique..... | 65 |
| 4.1 | Présentation du modèle dynamique | 65 |
| 4.2 | Procédure de caractérisation | 67 |
| 4.3 | Méthode d'identification des paramètres du modèle dynamique | 69 |
| 4.3.1 | Représentation de l'impédance du circuit R_{tc}/C_{dc} | 69 |
| 4.3.2 | Représentation de l'impédance du circuit $R_{\Omega} + R_{tc}/C_{dc}$ | 70 |
| 4.3.3 | Représentation de l'impédance du circuit $R_{\Omega} + R_{tc}/C_{dc} + Z_d$ | 70 |
| 4.3.4 | Modélisation du phénomène de diffusion..... | 71 |
| 4.3.5 | Identification des paramètres du modèle dynamique | 73 |
| 4.4 | Résultats de la caractérisation et modélisation | 74 |
| 4.4.1 | Caractérisation expérimentale et identification des paramètres du modèle..... | 74 |
| 4.4.2 | Simulation du modèle dynamique..... | 77 |
| 5 | Conclusion sur les caractérisations et modélisations des accumulateurs | 81 |
| III. | Chapitre 3 : Caractérisation et modélisation des supercondensateurs | 83 |
| 1 | Equipements de test et éléments testés..... | 83 |
| 1.1 | Banc de test des supercondensateurs | 83 |
| 1.2 | Supercondensateurs testés | 83 |
| 2 | Caractérisation pour la détermination du modèle standard R-C..... | 85 |
| 2.1 | Présentation du modèle standard R-C | 86 |
| 2.2 | Procédures de caractérisation..... | 86 |
| 2.2.1 | Procédures pour la détermination de la capacité..... | 86 |
| 2.2.2 | Procédures pour la détermination de la résistance série | 87 |
| 2.3 | Méthode d'identification des paramètres du modèle standard R-C..... | 88 |
| 2.4 | Résultats de la caractérisation et modélisation | 88 |
| 3 | Caractérisation pour la détermination du modèle à deux branches R-C..... | 92 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.1 | Présentation du modèle à deux branches R-C..... | 92 |
| 3.2 | Procédure de caractérisation | 94 |
| 3.3 | Méthode d'identification des paramètres du modèle à deux branches R-C..... | 94 |
| 3.4 | Résultats de la caractérisation et modélisation | 94 |
| 4 | Caractérisation pour la détermination du modèle dynamique..... | 98 |
| 4.1 | Présentation du modèle dynamique | 98 |
| 4.2 | Procédure de caractérisation | 98 |
| 4.3 | Méthode d'identification des paramètres du modèle dynamique | 99 |
| 4.4 | Résultats de la caractérisation et modélisation | 102 |
| 4.4.1 | Caractérisation expérimentale et identification des paramètres..... | 102 |
| 4.4.2 | Simulation du modèle dynamique..... | 109 |
| 5 | Conclusion sur les caractérisations et modélisations des supercondensateurs | 112 |
| IV. | Chapitre 4 : Validation de la modélisation | 114 |
| 1 | Gestion de l'énergie dans la poutre électrique | 114 |
| 1.1 | Architecture de la poutre électrique | 114 |
| 1.2 | Modélisation de la poutre électrique | 115 |
| 1.3 | Gestion de l'énergie dans la poutre électrique | 117 |
| 2 | Elaboration des profils de courant pour les éléments de stockage | 118 |
| 2.1 | Du profil de mission d'un aéronef au profil de charge de la poutre..... | 118 |
| 2.2 | Du profil de charge de la poutre au profil de courant pour les éléments de stockage | 121 |
| 2.2.1 | Profils de courant pour les sources du bus n°1..... | 121 |
| 2.2.1.1 | Commande de la poutre en configuration normale..... | 121 |
| 2.2.1.2 | Simulation de la poutre en configuration normale..... | 122 |
| 2.2.1.3 | Profil de courant pour la source ACC1 | 124 |
| 2.2.1.4 | Profil de courant pour la source SCAP1 | 124 |
| 2.2.2 | Profils de courant pour les sources du bus n°2..... | 126 |
| 2.2.2.1 | Commande de la poutre en mode dégradé | 126 |
| 2.2.2.2 | Simulation de la poutre en mode dégradé | 127 |
| 2.2.2.3 | Profil de courant pour la source SCAP2 | 128 |
| 3 | Validation des modèles d'accumulateur..... | 130 |
| 3.1 | Procédure d'essai pour la validation des modèles d'accumulateur | 130 |
| 3.2 | Résultats d'essais et évaluation des modèles d'accumulateur | 130 |
| 4 | Validation des modèles de supercondensateur | 134 |
| 4.1 | Procédure d'essai pour la validation des modèles de supercondensateur | 134 |
| 4.2 | Résultats d'essais et évaluation des modèles de supercondensateurs..... | 134 |
| 4.2.1 | Résultats d'essais et évaluation des modèles de cellule 650F..... | 134 |
| 4.2.2 | Résultats d'essais et évaluation des modèles de cellule 3000F..... | 138 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5 | Conclusion sur la validation de la modélisation | 140 |
| V. | Chapitre 5 : Dimensionnement des éléments de stockage..... | 141 |
| 1 | Introduction au dimensionnement des éléments de stockage..... | 141 |
| 1.1 | Dimensionnement d'un pack de supercondensateurs | 141 |
| 1.1.1 | Généralités sur les caractéristiques énergétiques d'un supercondensateur..... | 142 |
| 1.1.2 | Caractéristiques d'un pack de supercondensateurs | 144 |
| 1.1.3 | Méthode pour le dimensionnement d'un pack de supercondensateurs | 144 |
| 1.2 | Dimensionnement d'une batterie d'accumulateurs | 147 |
| 1.2.1 | Généralités sur les caractéristiques énergétiques d'un accumulateur..... | 147 |
| 1.2.2 | Caractéristiques d'une batterie d'accumulateurs..... | 148 |
| 1.2.3 | Méthode de dimensionnement d'une batterie d'accumulateurs | 148 |
| 1.3 | Dimensionnement des éléments de stockage de la poutre | 151 |
| 1.3.1 | Hybridation / association d'éléments de stockage | 151 |
| 1.3.2 | Association d'éléments de stockage dans la poutre électrique..... | 152 |
| 2 | Dimensionnement des éléments de stockage de la poutre électrique..... | 153 |
| 2.1 | Dimensionnement des éléments de stockage du bus n°1..... | 153 |
| 2.1.1 | Initialisation du dimensionnement des éléments de stockage du bus n°1..... | 153 |
| 2.1.2 | Résultats du dimensionnement | 156 |
| 2.2 | Dimensionnement des éléments de stockage du bus n°2..... | 159 |
| 2.2.1 | Initialisation du dimensionnement des éléments de stockage du bus n°2..... | 159 |
| 2.2.2 | Résultats du dimensionnement | 160 |
| 3 | Complément au dimensionnement des éléments de stockage | 162 |
| 3.1 | Diagramme Energie/Puissance des éléments de stockage | 162 |
| 3.1.1 | Diagramme Energie/Puissance d'un supercondensateur..... | 163 |
| 3.1.2 | Diagramme Energie/Puissance d'un accumulateur électrochimique..... | 164 |
| 3.2 | Diagramme Energie/Puissance des SSE de la poutre électrique | 165 |
| 3.3 | Complément au dimensionnement des éléments de stockage | 166 |
| 4 | Validation du dimensionnement..... | 169 |
| 4.1 | Validation du dimensionnement des SSE du bus n°1 | 169 |
| 4.2 | Validation du dimensionnement des SSE du bus n°2 | 171 |
| 5 | Conclusion sur le dimensionnement des éléments de stockage | 173 |
| VI. | Conclusion | 174 |
| VII. | Annexes | 177 |
| 1 | Annexe 1 : Complément sur les caractéristiques des accumulateurs..... | 178 |
| 2 | Annexe 2 : Fiche technique – Li-ion polymère 4,8Ah – Cellule Kokam SLPB11043140H | 180 |
| 3 | Annexe 3 : Synthèse des résultats sur les accumulateurs..... | 181 |
| 3.1 | Résultats expérimentaux | 181 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.1.1 | Caractérisation par chronopotentiométrie..... | 181 |
| 3.1.2 | Caractérisation par Spectrométrie d'Impédance Electrochimique | 183 |
| 3.2 | Résultats de simulation | 187 |
| 4 | Annexe 4 : Fiches techniques – Supercondensateurs | 189 |
| 4.1 | Supercondensateurs Maxwell | 189 |
| 4.2 | Supercondensateurs Batscap | 192 |
| 5 | Annexe 5 : Synthèse des résultats sur les supercondensateurs..... | 194 |
| 5.1 | Résultats expérimentaux | 194 |
| 5.1.1 | Caractérisation par chronopotentiométrie..... | 194 |
| 5.1.1.1 | Relevés expérimentaux lors d'une décharge à courant constant | 194 |
| 5.1.1.2 | Paramètres du modèle standard pour les supercondensateurs | 196 |
| 5.1.1.3 | Relevés expérimentaux lors d'une charge par créneau de courant..... | 198 |
| 5.1.1.4 | Paramètres du modèle à deux branches pour les supercondensateurs | 199 |
| 5.1.2 | Caractérisation par Spectrométrie d'Impédance Electrochimique | 200 |
| 5.1.2.1 | Relevés des spectres d'impédance à différentes températures et tensions | 200 |
| 5.1.2.2 | Paramètres du modèle dynamique pour les supercondensateurs | 202 |
| 5.2 | Résultats de simulation | 207 |
| 6 | Annexe 6 : Représentation dans le plan de Nyquist d'impédances complexes de composants de circuits électriques..... | 209 |
| 7 | Annexe 7 : Représentation Energétique Macroscopique | 211 |
| 7.1 | Les éléments de la REM | 211 |
| 7.2 | Les règles d'association | 214 |
| 7.3 | Structure de commande..... | 215 |
| | Glossaire..... | 218 |
| | Nomenclature | 219 |
| | Bibliographie | 228 |
| | Table des figures | 233 |
| | Liste des tableaux..... | 239 |

INTRODUCTION GENERALE

Nous sommes récemment entrés dans une ère où, pour des raisons environnementales et géopolitiques, on cherche à minimiser l'utilisation d'énergies fossiles pour la génération d'électricité et pour les moyens de transport. Cette orientation conduit à la prolifération d'énergies renouvelables, de type solaire ou éolien, entre autres. Cependant, le caractère intermittent de ces sources d'énergie pose des problèmes en termes de stabilité, de qualité ou encore de sûreté de fonctionnement des réseaux électriques auxquels elles sont connectées. Pour pallier au problème de disponibilité de l'énergie, on a recours à des systèmes de stockage qui emmagasinent l'énergie produite par ces sources dites « à faible émission de gaz à effet de serre » et la restituent lorsque les utilisateurs en expriment la demande. Les moyens de stockage permettent de découpler temporellement l'instant où l'énergie est générée de l'instant où elle est consommée, ils assurent alors une fonction de tampon d'énergie. De plus, les problématiques de qualité et stabilité d'un réseau peuvent être traitées par la connexion de systèmes de stockage qui fournissent ou absorbent une puissance pour compenser ses variations, exerçant ainsi une fonction de lissage. Concernant les moyens de transport, l'avènement de véhicules « plus électriques » ou hybrides contribue à la réduction de la consommation en hydrocarbures. Ces véhicules disposent de systèmes de stockage d'énergie, pouvant fournir toute ou partie des besoins énergétiques en fonction du taux d'hybridation et de la mission du véhicule. Dans certains moyens de transport, les éléments de stockage fournissent l'intégralité de l'énergie nécessaire lorsque les autres sources sont indisponibles ou défaillantes. Les systèmes de stockage assurent alors des fonctions d'aide au démarrage en début de mission ou de secours électrique en cas de panne. En outre, les problématiques observées sur les réseaux électriques couplés s'appliquent également au réseau local et embarqué dans un véhicule et, de la même manière, les systèmes de stockage participent à leur résolution.

Dans un système stationnaire ou embarqué, l'énergie est « transportée » par un vecteur énergétique, puis elle est transformée, convertie et mise en forme pour convenir à son application finale. Il existe plusieurs vecteurs énergétiques dont les principaux sont la chaleur, l'électricité et le dihydrogène. L'électricité est certainement un des vecteurs les plus souples de par la facilité et la multiplicité des conversions qu'elle offre. En revanche, elle présente l'inconvénient d'être difficile à stocker. Pour autant, l'énergie électrique n'est pas toujours stockée sous cette forme et peut être stockée sous une autre forme après une conversion électrochimique, électromécanique, Le problème du stockage de l'énergie n'est pas récent et il est encore considéré comme un des verrous technologiques au développement des véhicules électriques et hybrides. Cependant, l'émergence de nouvelles technologies de composants, de moyens de conversion et d'outils de gestion de l'énergie conduit à envisager concrètement le stockage de l'énergie électrique dans bon nombre d'applications. Les problématiques associées au stockage de l'énergie électrique sont d'ordre technico-économique et une des solutions apportées est l'hybridation ou l'association de plusieurs moyens de stockage présentant des caractéristiques complémentaires. L'intérêt est alors d'exploiter efficacement et de manière optimale chacune des composantes du système de stockage. Pour y parvenir, il est indispensable de connaître les propriétés des divers moyens de stockage dans la perspective de leur application finale.

Dans un véhicule, l'énergie électrique peut être l'énergie principale nécessaire à la traction du véhicule ou peut être une énergie secondaire pour alimenter les fonctions auxiliaires ou de servitude (par exemple, les fonctions assurant la sécurité, l'aide à la conduite ou le confort). Dans un aéronef, avion ou hélicoptère, l'énergie électrique n'est pas utilisée comme énergie principale car les machines thermiques (qui fournissent la puissance mécanique nécessaire à la poussée d'un avion, à la mise en rotation de propulseurs ou de rotors) ne peuvent être remplacées par des moteurs électriques de même densité d'énergie. Toutefois, l'énergie électrique est utilisée pour l'alimentation de nombreux auxiliaires (instruments de bord, équipements de mission, ...) dans les aéronefs. En effet, l'énergie à bord d'un aéronef se trouve sous plusieurs formes :

hydraulique, électrique et pneumatique, mais l'énergie électrique devient une solution de plus en plus privilégiée pour la mise en œuvre des fonctions de servitude.

Depuis quelques années, on s'oriente vers des avions « plus électriques » dans lesquels une partie de l'énergie hydraulique est remplacée par l'énergie électrique. Cette migration énergétique s'explique par le souci d'optimisation de l'énergie embarquée, de flexibilité d'utilisation et de réduction de la masse et des coûts d'utilisation. De fait, les besoins en énergie électrique sont de plus en plus importants dans les avions ou les hélicoptères et les architectures évoluent. Ainsi, sont développées de nouvelles technologies et méthodes pour générer l'énergie électrique (optimisation et réversibilité des machines), pour la distribuer (via des réseaux alternatifs, des bus continus, des réseaux maillés, ...), pour la convertir afin de l'adapter aux actionneurs électriques (les progrès en électronique de puissance contribuent notablement à l'électrification des fonctions auxiliaires), et pour la stocker (récupération et restitution de l'énergie).

Dans le domaine aéronautique, l'optimisation du rendement énergétique global, la réduction des masses embarquées et la nécessité de répondre aux besoins énergétiques croissants conduisent à gérer au mieux l'énergie embarquée. C'est dans ce contexte que s'inscrit le Projet porté par la DGA (Direction Générale de l'Armement) et mené conjointement par les Partenaires et le département Energie du laboratoire FEMTO-ST.

Le Projet consiste en l'étude, la réalisation et l'évaluation d'une poutre électrique d'avion mettant en œuvre une stratégie de gestion de l'énergie. Une poutre électrique comprend les moyens de génération, de stockage, de distribution et de conversion de l'énergie électrique dans un avion. L'objectif de ce projet est d'analyser l'intérêt de doter un avion de nouvelles sources d'énergie complémentaires de celles existantes, par rapport à ses besoins en opération et en fonction de contraintes environnementales. Pour atteindre cet objectif final, le Projet a été décomposé en plusieurs étapes : la première est l'étude de la poutre électrique, notamment son architecture et l'analyse des besoins énergétiques d'un avion « plus électrique » ; la deuxième étape est la caractérisation en vue de leur modélisation des composants de la poutre, dont les éléments de stockage ; la troisième étape est la détermination et l'évaluation par simulation numérique d'une stratégie de gestion de l'énergie ; enfin la quatrième étape est la réalisation d'un démonstrateur pour l'évaluation de ses performances par des essais et la validation des lois de gestion de l'énergie. Les travaux exposés dans ce document sont en lien avec les trois premières étapes du projet et plus particulièrement avec la deuxième, relative à la caractérisation et à la modélisation des composants de stockage.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du Projet, ainsi que de deux autres thèses dont les thématiques sont connexes : les travaux de Daniel Bienaimé, réalisés au laboratoire FEMTO-ST, constituent la troisième étape du projet citée ci-dessus, à savoir la gestion de l'énergie dans la poutre complète et son évaluation par simulation numérique ; les travaux de Joseba Asensio-Sauto, co-encadrés par le laboratoire FEMTO-ST et un Partenaire, sont relatifs à la modélisation plus fine de la poutre en vue d'une étude de la qualité du réseau et d'une comparaison avec les essais effectués sur le démonstrateur (dernière étape du Projet). Ces divers travaux sont donc complémentaires les uns par rapport aux autres et sont en lien avec les problématiques du Projet. La coordination entre les attentes du Projet et les travaux de recherche réalisés au laboratoire d'une part et le suivi du Projet d'autre part ont été menés en parallèle de cette thèse.

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent donc la caractérisation, la modélisation et l'évaluation des performances de composants de stockage de l'énergie, de technologies nouvelles en vue de leur implantation dans un avion.

L'une des spécifications du Projet est d'étudier la possibilité d'équiper un avion avec de nouveaux moyens de stocker l'énergie, dont les performances sont complémentaires de celles des sources existantes. Dans cette thèse, les composants étudiés sont des supercondensateurs et des accumulateurs électrochimiques Lithium-ion polymère. Les supercondensateurs sont considérés comme une source de puissance, capable de fournir une forte puissance sur un temps court et sur un nombre de cycles élevé ; ce type de composant n'est pas utilisé actuellement dans les avions retenus pour l'étude. Les accumulateurs électrochimiques sont ici

considérés comme une source d'énergie, complémentaire des supercondensateurs, capable de fournir une puissance moyenne sur une longue période ; les avions actuels sont équipés de batteries d'accumulateurs de technologie autre que celle étudiée dans cette thèse, à savoir la technologie Lithium-ion polymère dont les performances énergétiques sont supérieures.

Pour analyser l'intérêt d'associer ces éléments de stockage et de les intégrer dans la poutre électrique, on a recours à la simulation numérique du fonctionnement du système. Pour ce faire, il est indispensable de modéliser le système à étudier. La modélisation dépend de l'utilisation du modèle lors de la simulation. En effet, pour évaluer la stratégie de gestion de l'énergie par simulation, il est nécessaire de disposer d'un modèle moyen de la poutre électrique. Par contre, l'analyse par simulation de la qualité ou de la stabilité du réseau de bord nécessite des modèles de composants dont la granularité est plus fine que celle des modèles utilisés pour valider la stratégie de gestion de l'énergie. Plusieurs modèles sont donc élaborés dans ce document.

Pour modéliser les composants de stockage, on procède à des essais de caractérisation. L'établissement de plusieurs modèles implique la réalisation de différentes caractérisations pour identifier les paramètres de ces modèles. En outre, ces caractérisations permettent d'appréhender le comportement des éléments de stockage dans des conditions expérimentales proches de celles de l'application finale.

Avant d'aborder leur caractérisation et leur modélisation, un état de l'art des systèmes de stockage est proposé dans le premier chapitre. Il s'agit de passer en revue les différents systèmes de stockage décentralisés et réversibles susceptibles de convenir à l'Application. Afin de les comparer, différents critères, notamment énergétiques, sont définis et renseignés pour chacun des systèmes de stockage. Dans un second temps, les moyens de stockage utilisés actuellement dans l'aéronautique sont décrits, ainsi que leurs fonctions à bord. En fin de chapitre, la présentation des besoins énergétiques et de l'architecture de la poutre électrique met en exergue l'évolution vers un avion « plus électrique » impliquant une utilisation différente des éléments de stockage et nécessitant de nouvelles technologies. Les composants de stockage retenus dans le Projet sont donc des supercondensateurs et des accumulateurs électrochimiques Lithium-ion polymère. Ces éléments sont nouveaux pour l'Application et d'autant plus dans le cadre d'une utilisation tout au long d'une mission. Dans le but de connaître leurs performances et leur aptitude à être actifs dans la gestion d'énergie, ces composants de stockage sont caractérisés et modélisés.

Le deuxième chapitre est donc consacré à la caractérisation en vue de la modélisation des accumulateurs électrochimiques de technologie Lithium-ion polymère. Les essais de caractérisation sont réalisés sur un banc de test spécialement conçu pour le Projet et décrit en début de chapitre. Les méthodes d'essais électriques pour caractériser la cinétique électrochimique des composants sont la chronopotentiométrie à courant constant et la spectrométrie d'impédance électrochimique. A partir des résultats, les paramètres des modèles retenus sont identifiés. Pour les accumulateurs électrochimiques, deux modèles par circuit électrique équivalent sont pertinents compte tenu de leur utilisation : le premier modèle développé est un modèle quasi-statique, fonctionnel et suffisant pour être intégré dans le modèle global de la poutre, dans l'optique de simuler son fonctionnement sur une mission complète ; le second modèle est un modèle dynamique, comportemental et nécessaire pour une étude plus fine du système. Les essais de caractérisation sont réalisés autour de plusieurs points de fonctionnement (à divers états de charge) et à différentes températures. Ils sont effectués dans des conditions expérimentales en cohérence avec l'application finale, celles-ci définissent le domaine de validité des modèles. La cohérence des résultats de ces différents protocoles est analysée. Enfin, ces caractérisations permettent une meilleure connaissance des composants : détermination de la capacité nominale, évolution de la tension à vide en fonction de l'état de charge, influence de la température sur les performances de l'accumulateur, comportement fréquentiel, ...

Le troisième chapitre est dédié à la caractérisation et à la modélisation des supercondensateurs. Pour ces composants, trois modèles sont retenus. Tout d'abord, un modèle standard est développé. Ce modèle est normalisé et utilisé par les constructeurs pour définir les caractéristiques de leurs produits. Ensuite, un modèle à deux branches R-C est développé. Il s'agit d'un modèle fonctionnel qui tient compte de la variation de la

capacité en fonction de la tension à ses bornes. Ce modèle peut être intégré dans un modèle complet de la poutre car il contient les informations liées à la capacité de stockage du composant et à sa constante de temps. Enfin, le troisième modèle développé est un modèle dynamique, composé d'une impédance complexe représentant les phénomènes de diverses constantes de temps, définissant le comportement fréquentiel des supercondensateurs. Des essais de caractérisation sont menés pour identifier les paramètres des modèles, autour de plusieurs points de fonctionnement (tensions) et à différentes températures. Ces caractérisations permettent, entre autres, de confronter les résultats avec les informations contenues dans les fiches techniques des fournisseurs et d'appréhender leur fonctionnement sur le domaine d'application. Là encore, un soin particulier est apporté à l'analyse de la cohérence des résultats issus de protocoles différents.

La validation des modèles établis dans les chapitres II et III est présentée dans le quatrième chapitre. Elle est réalisée sur des profils de charge issus de l'Application. Dans un premier temps, les profils de charge pour chacun des éléments de stockage sont élaborés à partir d'un profil de mission type d'un aéronef. La démarche pour définir les profils de charge des moyens de stockage est expliquée, elle consiste à répartir les besoins énergétiques de la poutre entre les différentes sources et particulièrement les éléments de stockage par l'application d'une gestion de l'énergie. Dans un second temps, ces profils de courant sont appliqués aux composants lors d'essais de validation. Le but des essais est de s'assurer que les modèles établis sont valables sur le domaine lié à l'Application et qu'ils traduisent fidèlement le comportement des composants pour être ensuite implantés dans un modèle global.

Enfin le dimensionnement des éléments de stockage est abordé dans le dernier chapitre. Après un rappel des méthodes de dimensionnement des packs de supercondensateurs et des batteries d'accumulateurs, un dimensionnement est proposé en associant les deux sources de la manière la plus judicieuse pour réduire la masse du système de stockage. Dans un aéronef conventionnel, les batteries d'accumulateurs ont pour rôle d'assurer le démarrage de l'aéronef et sont dimensionnées pour cette fonction. Dans un aéronef plus électrique, les éléments de stockage sont multiples. Leur fonction est d'assurer le démarrage de l'aéronef, mais également de fournir une puissance en complément des sources existantes tout au long de la mission. Leur dimensionnement doit donc tenir compte de ce changement de périmètre fonctionnel. En fin de chapitre, une validation du dimensionnement est réalisée, par simulation du comportement des éléments de stockage, en réponse à un profil de charge type.

I. CHAPITRE 1 : LE STOCKAGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

Les moyens de stocker l'énergie électrique sont divers et variés et peuvent être classés dans différentes catégories en fonction de leurs performances (capacité de stockage, énergie/puissance, ...) et de leurs caractéristiques : stockage centralisé ou décentralisé, direct ou indirect. Le stockage est dit « centralisé » lorsque le moyen de stockage est couplé au réseau de distribution de l'énergie électrique. Il est « décentralisé » lorsque le dispositif de stockage est embarqué dans un dispositif mobile et autonome en termes d'énergie. On distingue également le stockage direct et indirect. Pour le stockage « direct », l'énergie est stockée sous sa forme électrique. Dans le cas d'un stockage « indirect », l'énergie est stockée sous une autre forme : électrochimique, mécanique ou gazeuse (air, hydrogène), nécessitant une conversion réversible pour passer d'une forme à une autre. Ce premier chapitre est consacré aux SSE (Systèmes de Stockage de l'Energie) que l'on peut embarquer dans un véhicule, il s'agit donc d'un stockage décentralisé, direct ou indirect.

Dans le contexte des Véhicules Electriques et Hybrides (VEH) décrit en introduction, il apparaît que l'hybridation des sources énergétiques en général et des moyens de stockage en particulier est un jalon technologique dans leur développement. L'intérêt d'hybrider différents éléments de stockage est alors de tirer profit de leur complémentarité, en termes de performances notamment. Dans ce chapitre, on distinguera deux familles de SSE selon leur aptitude à stocker et à restituer de l'énergie sur une durée plus ou moins longue, autrement dit selon qu'ils sont considérés comme des sources de puissance ou des sources d'énergie.

Les objectifs de ce premier chapitre sont de passer en revue les moyens de stockage direct ou indirect qui peuvent être embarqués, de les répertorier dans les catégories « source de puissance » ou « source d'énergie », de les comparer les uns par rapport aux autres et enfin d'identifier ceux qui regroupent les caractéristiques nécessaires pour être implantés dans une application aéronautique.

Dans un premier temps, les caractéristiques des éléments de stockage sont définies, ainsi que les critères retenus pour les comparer. Les deuxième et troisième parties sont respectivement consacrées à un état de l'art des moyens de stockage, vus comme des éléments de puissance ou d'énergie. Une comparaison de ces différents SSE est proposée en quatrième partie. En fin de chapitre, sont abordés les moyens de stockage employés dans l'aéronautique et présentés ceux qui ont été retenus pour l'Application dans le cadre du Projet.

1 CARACTERISTIQUES DES ELEMENTS DE STOCKAGE

Avant de passer en revue les différents moyens de stockage envisageables dans une application embarquée, il est nécessaire de définir les caractéristiques remarquables d'un Système de Stockage de l'Energie [1] et d'établir celles qui seront retenues comme critère de comparaison.

Tout d'abord, un SSE est caractérisé par deux grandeurs fondamentales que sont l'énergie et la puissance.

Energie - L'énergie stockée est la quantité d'énergie disponible dans le système de stockage. L'énergie s'exprime en Wh ou en J¹. Parce que l'énergie d'un système ne peut pas toujours être entièrement restituée, on distingue l'énergie maximum stockée $W_{stockée}$ [Wh] obtenue après la charge complète du système, et l'énergie utile W_{utile} [Wh]. L'énergie utile est fonction de la profondeur de décharge applicable au dispositif de stockage. La densité énergétique, appelée également énergie spécifique, est l'énergie stockée ramenée à la masse ou au volume de l'élément de stockage. On distingue donc la densité énergétique massique en Wh.kg⁻¹ et la densité énergétique volumique en Wh.L⁻¹ ou Wh.dm⁻³.

Puissance - La puissance disponible P_d (en W) est la puissance qu'un système de stockage d'énergie peut fournir lors de sa décharge. On détermine généralement une puissance moyenne P_{moy} [W] et/ou une puissance

¹ Rappel : 1J (SI) = 1Ws ; 1Wh = 3600J

maximum P_{max} [W]. La densité de puissance, ou puissance spécifique, est la puissance disponible rapportée à la masse ou au volume de l'élément de stockage. Elle s'exprime en $W.kg^{-1}$, $W.L^{-1}$ ou $W.dm^{-3}$.

Diagramme Energie/Puissance - Il est d'usage de recenser sur un diagramme les caractéristiques énergétiques d'un SSE pour faciliter leur comparaison. Ce diagramme, appelé diagramme de Ragone [2], représente la puissance en fonction de l'énergie (ou inversement) ou leurs densités respectives. La surface généralement représentée est bornée par les limites minimales et maximales en termes de puissance et d'énergie du moyen de stockage. Sur l'exemple donné en Figure I-1, l'élément de stockage représenté par un rectangle est capable de fournir une certaine énergie quelle que soit la puissance, dès lors que celles-ci sont comprises dans leurs intervalles respectifs $[W1min ; W1max]$ et $[P1min ; P1max]$. L'élément de stockage représenté par un triangle peut restituer son énergie minimale $W2min$ sur toute la plage de puissance $[P2min ; P2max]$, mais l'augmentation de son autonomie (fonctionnement à plus haute énergie) ne peut se faire qu'aux dépens de la puissance restituée.

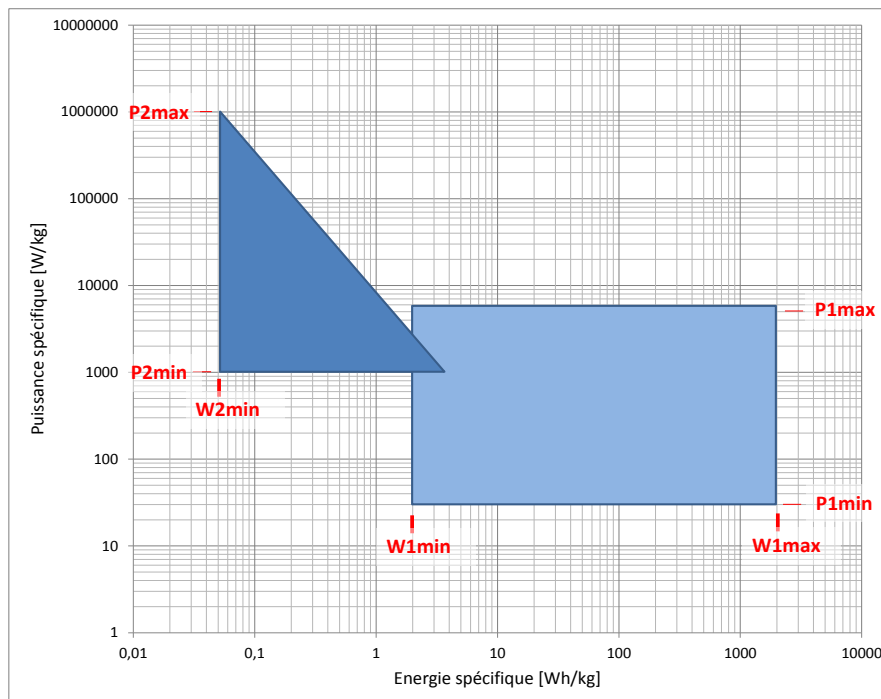


FIGURE I-1 : EXEMPLE DE DIAGRAMME DE RAGONE ENERGIE/PUISSANCE

D'autres caractéristiques techniques, souvent liées aux deux grandeurs citées précédemment, sont également à prendre en compte : la capacité de stockage, les temps de charge et décharge, l'autonomie, la durée de vie, l'autodécharge et le rendement énergétique.

Capacité de stockage – Il s'agit de l'aptitude d'un système à emmagasiner de l'énergie, à la conserver pendant un certain temps et à la restituer dans des conditions données.

Temps de décharge / Temps de charge - Pour un SSE, la durée ou le temps de décharge est un critère important, puisqu'elle qualifie son aptitude à restituer rapidement son énergie stockée. On définit la durée de décharge comme étant le temps de restitution de l'énergie stockée par le système, à puissance maximum, tel que : $t_{dech} = W_{stockée} / P_{max}$. Pour certains éléments de stockage, la durée de charge pourra s'avérer comme un critère déterminant dans la comparaison des uns par rapport aux autres. En effet, certains SSE sont limités en puissance lors de la recharge, ce qui impacte directement leur temps de charge.

Autonomie - On détermine l'autonomie d'un système de stockage en considérant son énergie utile et sa puissance disponible. Le rapport des deux donne une durée [s] telle que : $\alpha = W_{utile} / P_d$.

Durée de vie (cyclage) - La durée de vie ou durabilité définit l'aptitude d'un élément de stockage à délivrer, de manière récurrente, son énergie après recharge. Elle s'exprime en nombre de cycles, un cycle comprenant une

charge et une décharge. Le nombre de cycles est un des critères de comparaison entre les divers éléments de stockage. Il convient de nuancer le nombre de cycles par les propriétés d'un cycle (amplitude, fréquence, contraintes de l'environnement sur le système qui peuvent agir sur le vieillissement du système, ...)

Autodécharge - Il s'agit d'une certaine quantité d'énergie initialement stockée dans l'élément et progressivement dissipée lorsque l'élément est hors fonctionnement. Elle s'exprime relativement [%], par rapport à l'énergie stockée.

Rendement énergétique – Le rendement énergétique pour un élément de stockage est le rapport entre l'énergie restituée sous la forme souhaitée (ici électrique) et l'énergie stockée sous quelque forme que ce soit.

Enfin, d'autres caractéristiques plus qualitatives sont à considérer : la sécurité, la recyclabilité, la maturité de la technologie et le coût d'application.

Sûreté de fonctionnement - Cette notion traduit l'aptitude d'un système à satisfaire une ou plusieurs fonctions données dans des conditions déterminées. La sûreté de fonctionnement englobe les aspects de fiabilité, de maintenabilité et de disponibilité liés à aux performances fonctionnelles du système, et des aspects de sécurité (risques humains, environnementaux, financiers, ...). De manière générale, la sûreté de fonctionnement est considérée comme la science des défaillances et des pannes d'une entité (organisation, système, produit, ...).

Impact environnemental - Il s'agit de prendre en compte l'impact sur l'environnement du SSE pendant son cycle de vie (fabrication, utilisation, recyclage en fin de vie), au regard des réglementations en vigueur.

Etat de la technologie / Application - Les différentes technologies peuvent présenter des niveaux de maturité divers (du prototype de démonstration aux produits fabriqués à des millions d'exemplaires) et des champs d'application variés (de confidentiel à grand public).

Coûts + investissement - Dans la mesure du possible, les coûts du système et des investissements associés peuvent être renseignés. Pour les moyens de stockage directs et indirects (nécessitant une conversion), il faut considérer le système dans sa globalité, c'est-à-dire ne pas se limiter au moyen de stockage sous forme d'énergie magnétique, électrostatique, chimique, cinétique, hydrogène, ... mais prendre également en compte les auxiliaires et les éléments de conversion pour transformer l'énergie électrique en énergie stockée et la restituer.

Les caractéristiques techniques Energie et Puissance sont couramment représentées dans un diagramme de Ragone (Figure I-1). Mais on peut également regrouper un certain nombre de caractéristiques d'un SSE dans un diagramme appelé « toile d'araignée » (Figure I-2).

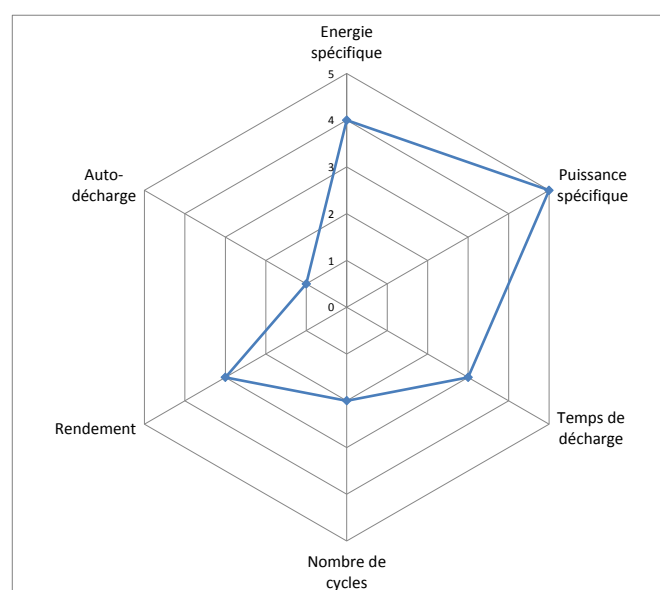


FIGURE I-2 : EXEMPLE DE DIAGRAMME « TOILE D'ARAIGNEE »

Ce diagramme présente l'avantage de répertorier différentes caractéristiques, qu'elles soient techniques ou d'ordre plus général, en en donnant une information relative (sur une échelle de 1 à 5 par exemple, le niveau 5 indiquant la meilleure performance), pour faciliter la comparaison entre SSE.

La réalisation de ce diagramme nécessite d'avoir établi au préalable des échelles de valeurs pour chacun des critères retenus [3]. Pour la comparaison des moyens de stockage qui seront présentés dans ce premier chapitre, six critères sont proposés pour cette étude et sont synthétisés dans le Tableau I-1. Ce sont des critères quantifiables traduisant les performances énergétiques de ces systèmes. Les critères tels que la sécurité, la recyclabilité, l'état de la technologie, couramment employés dans la littérature, sont davantage qualitatifs et moins faciles à évaluer. C'est la raison pour laquelle ces caractéristiques n'ont pas été retenues pour établir les diagrammes « toile d'araignée ».

| Caractéristique | Unité | Indice 1 | Indice 2 | Indice 3 | Indice 4 | Indice 5 |
|-----------------------|------------------------|----------|-------------|----------------|-----------------------------------|-------------------|
| Energie spécifique | [Wh.kg ⁻¹] | < 5 | 5 - 30 | 30 - 100 | 100 - 200 | > 200 |
| Puissance spécifique | [W.kg ⁻¹] | 10 - 100 | 10 - 1000 | 100 - 1000 | 10 - 10 000 | > 10 ⁴ |
| Temps de décharge | [s] | < 0,01 | 0,01 - 1 | 1 - 100 | 100 - 1000 | > 1000 |
| Nombre de cycles | | < 1000 | 1000 - 2000 | 2000 - 100 000 | 10 ⁵ - 10 ⁶ | > 10 ⁶ |
| Rendement énergétique | [%] | < 50 | 50 - 75 | 75 - 90 | 90 - 98 | > 98 |
| Autodécharge | [% / jour] | > 5 | 1 - 5 | 0,5 - 1 | 0,1 - 0,5 | < 0,1 |

TABLEAU I-1 : CRITERES D'EVALUATION ET DE COMPARAISON DES MOYENS DE STOCKAGE

L'état de l'art présenté dans les deux paragraphes suivants a été mené avec le souci de collecter suffisamment d'informations pour pouvoir les recouper et les comparer suivant les caractéristiques choisies. Ainsi, les diagrammes de Ragone et « toile d'araignée » présentés pour chaque moyen de stockage, sont la synthèse de plusieurs sources. Ils ont été expressément remis en forme dans le cadre de cette étude, pour intégrer l'ensemble des résultats jugés pertinents.

2 LES ELEMENTS DE STOCKAGE COMME DES SOURCES DE PUISSANCE

Pour chaque élément de stockage, on rappellera brièvement le principe de fonctionnement avant de présenter ses caractéristiques remarquables. Les moyens de stockage considérés comme des sources de puissance, relativement à l'échelle de temps de l'Application, sont :

- les condensateurs
- les supercondensateurs
- les bobines supraconductrices ou SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)
- les volants d'inertie

2.1 CONDENSATEURS

Les condensateurs sont des composants de stockage électrostatique, direct, considérés comme une source de puissance dans une certaine mesure, compte tenu de leur grande puissance spécifique et leur densité d'énergie relativement faible.

2.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Un condensateur se compose de deux électrodes, d'un isolant diélectrique entre les deux électrodes et de deux éléments de connexion pour permettre la liaison électrique du composant. Un condensateur permet

d'emmagasiner transitoirement une charge électrique entre les deux électrodes séparées par un isolant diélectrique [4].

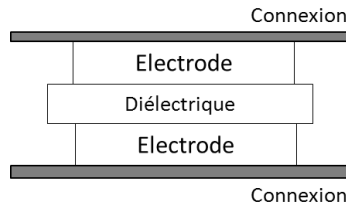


FIGURE I-3 : STRUCTURE D'UN CONDENSATEUR

2.1.2 TECHNOLOGIES

On distingue plusieurs familles de condensateurs suivant la nature de l'isolant et des électrodes :

- condensateur céramique
- condensateur électrochimique ou électrolytique
- condensateur à film plastique

| Famille de condensateur | Isolant | Permittivité relative | Epaisseur de l'isolant | Gamme de tension | Gamme de capacité |
|-------------------------|--|-----------------------|------------------------|------------------|-------------------|
| Céramique | BaTiO ₃ | de 3000 à 10 000 | 1μm | de 5 à 250V | de 1pF à 100μF |
| Electrochimique | Al ₂ O ₃ liquide | de 8 à 10 | 1,4nm.V ⁻¹ | de 6 à 600V | de 10μF à 1F |
| | Al ₂ O ₃ solide | | | de 6 à 40V | de 1μF à 1mF |
| | Ta ₂ O ₅ gélifié | 27 | | de 6 à 500V | de 1μF à 1mF |
| | Ta ₂ O ₅ solide | | | de 6 à 50V | de 100nF à 1mF |
| Film plastique | PP, PS, PEN, PET, PPS | de 2,2 à 6 | de 0,9 à 6μm | de 50 à 2000V | de 100pF à 10μF |

TABLEAU I-2 : CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE CONDENSATEUR [4]

2.1.3 GRANDEURS CARACTERISTIQUES

Dans ce paragraphe, sont définies les grandeurs caractéristiques d'un condensateur. Elles sont relatives aux performances électriques du composant. On retrouve généralement ces caractéristiques dans les fiches des constructeurs.

La charge d'un condensateur est donnée par la relation suivante :

$$Q_c = \int I \cdot dt \quad \text{I-1}$$

- Avec :
- Q_c : charge du condensateur [C]
 - I : intensité dans le condensateur [A]
 - t : temps [s]

La capacité d'un condensateur est donnée par la relation suivante :

$$C_c = Q_c / U \quad \text{I-2}$$

- Avec :
- C_c : capacité du condensateur [F]
 - Q_c : charge du condensateur [C]
 - U : tension aux bornes du condensateur [V]

La capacité est également fonction de la structure du condensateur (condensateur plan, cylindrique, sphérique,...). En effet, la capacité dépend de l'épaisseur (distance entre les deux électrodes) et de la nature (permittivité) de l'isolant et de la géométrie des électrodes. Pour un condensateur plan, la capacité s'exprime comme suit :

$$C_c = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S/e \quad \text{I-3}$$

Avec : C_c : capacité du condensateur [F]
 ϵ_0 : permittivité du vide ² [F.m⁻¹]
 ϵ_r : permittivité relative du diélectrique ou constante diélectrique
 S : surface en regard des électrodes [m²]
 e : épaisseur de l'isolant [m]

L'énergie stockée dans un condensateur est proportionnelle à sa capacité, suivant la relation :

$$W_c = \frac{1}{2} C_c \cdot U^2 \quad \text{I-4}$$

Avec : W_c : énergie stockée dans le condensateur [J]
 C_c : capacité du condensateur [F]
 U : tension aux bornes du condensateur [V]

2.1.4 PROPRIETES

Les propriétés d'un condensateur sont :

- une capacité de stockage très faible
- une tenue en tension jusqu'à 300V.µm⁻¹ pour les condensateurs films [5]
- une densité énergétique volumique de l'ordre de 0,1 à 0,2Wh.L⁻¹ pour les condensateurs utilisés en électronique de puissance [4], [5]
- une constante de temps très faible : la décharge d'un condensateur s'effectue en quelques fractions de millisecondes [5]

La Figure I-4 présente le diagramme de Ragone et le diagramme « toile d'araignée » pour les condensateurs.

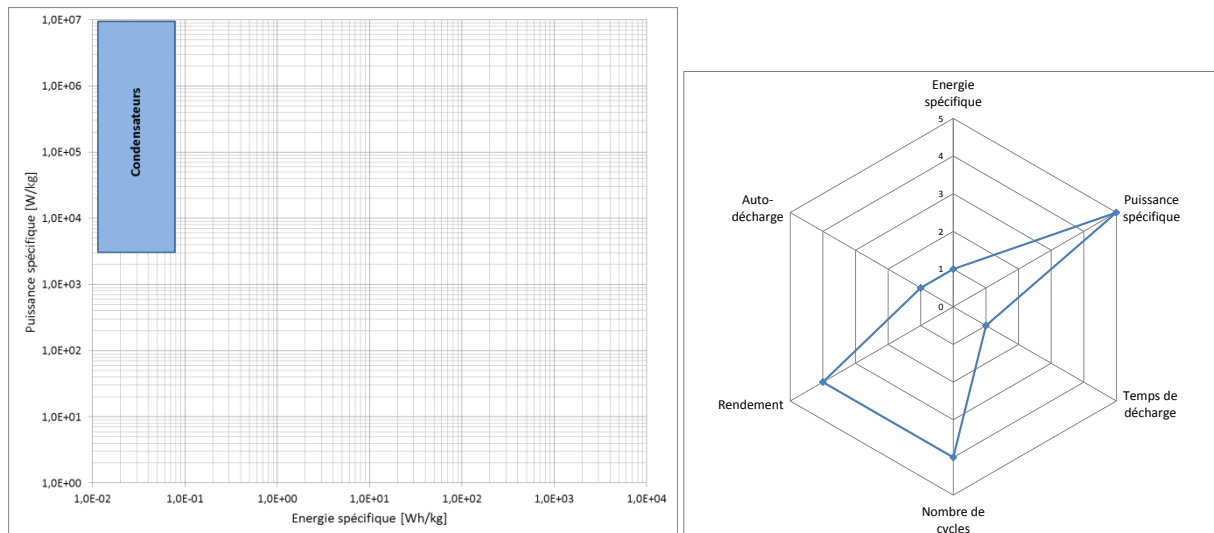


FIGURE I-4 : DIAGRAMMES DE RAGONE ET TOILE D'ARAIGNEE - CONDENSATEURS

² $\epsilon_0 = (36 \cdot \pi)^{-1} \cdot 10^{-9} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

Les condensateurs films sont plus fiables que les condensateurs électrochimiques au regard de l'étude des modes de défaillances : une défaillance sur un condensateur peut conduire jusqu'à la détérioration matérielle du composant [6], un processus d'auto-cicatrisation [7] a été mis au point sur certains condensateurs afin de limiter la dégradation du composant.

2.1.5 APPLICATIONS

Le stockage de l'énergie est une des applications des condensateurs. Pour le stockage, les condensateurs électrochimiques et films sont privilégiés par rapport aux condensateurs céramiques. Les autres applications de condensateurs sont : accord de circuits oscillants, résonateurs, découplage, liaison, filtrage ou encore compensation en température... Les domaines d'application des condensateurs sont ceux de l'électronique : télécommunications, informatique, automobile, spatial, ... Leur application en grande quantité et depuis un grand nombre d'années fait que leur coût est relativement faible, que les technologies sont éprouvées et que le retour d'expérience est important.

2.2 SUPERCONDENSATEURS

Les supercondensateurs sont des moyens de stockage direct, électrostatique (et électrochimique), considérés comme des sources de puissance de par leur grande densité de puissance.

2.2.1 ORIGINE / HISTORIQUE

D'après [8], le premier brevet relatif aux supercondensateurs est attribué à Becker (pour la société General Electric) en 1957. L'invention concernait un mode de stockage d'énergie électrostatique reposant sur la double couche électrique développée à l'interface entre un matériau carboné poreux et un électrolyte aqueux (acide sulfurique) dont il était imprégné. En 1969, la société Sohio a déposé un autre brevet concernant un supercondensateur à électrolyte non aqueux permettant des tensions plus élevées. La commercialisation de supercondensateurs n'intervient que dans les années 1970, par les sociétés NEC et Matsushita. Ces composants à électrode en charbon actif et à électrolyte aqueux ou organique sont de faible capacité (quelques Farad) et de faible puissance. Les composants à plus forte puissance et forte énergie spécifique n'apparaissent que dans les années 1990.

2.2.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Un supercondensateur se compose de deux collecteurs métalliques (généralement en aluminium), deux électrodes carbonées poreuses imprégnées d'électrolyte et d'une membrane poreuse isolante (pour assurer la conduction ionique et séparer électriquement les électrodes).

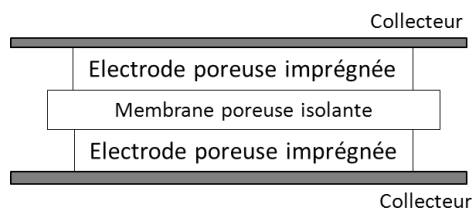


FIGURE I-5 : STRUCTURE D'UN SUPERCONDENSATEUR

Le stockage d'énergie dans un supercondensateur est fait sous forme de champ électrostatique entre deux électrodes [1], [8]. Il ne s'agit donc pas d'un stockage électrochimique comme pour un accumulateur, mais bien d'un stockage électrostatique, comme pour un condensateur, à ceci près que l'isolant diélectrique est remplacé par un électrolyte conducteur d'ions. Un supercondensateur n'est pas basé sur le principe de la polarisation diélectrique (condensateur) pour le stockage de l'énergie, mais sur le principe de la double couche électrique [9] : lorsque l'on applique une tension entre deux électrodes immergées dans une solution électrolytique (l'électrolyte étant conducteur ionique et isolant électronique), une double couche électrique se forme à l'interface séparant les deux corps. La dissymétrie moléculaire de l'électrolyte et de l'électrode conduit à l'apparition de charges à l'interface électrolyte / électrode (effet de Helmholtz). Ainsi les charges accumulées à la surface de l'électrode sont équilibrées par celles, de nature ionique, qui s'accumulent dans l'électrolyte. On a alors des charges opposées, séparées par une distance infinitésimale, que l'on appelle double couche électrique. Les deux couches électriques ainsi formées se comportent comme un condensateur dont la capacité dépend de la surface effective de contact.

2.2.3 TECHNOLOGIES

On distingue plusieurs technologies de supercondensateurs [10], dont certaines sont proches des technologies d'accumulateurs.

Il existe différentes technologies d'électrodes, elles peuvent être :

- en matériaux à base de charbon actif
- en matériaux inorganiques : à base d'oxyde de métaux de transition (MnO_2 , V_2O_5 , ...) ou d'oxyde de métaux nobles (ex : RuO_2 , ...)
- en matériaux organiques : polymères à conduction électronique

Les supercondensateurs les plus répandus sont à électrodes en charbon actif. Leurs performances sont variables en fonction du type d'électrolyte :

- électrolyte aqueux
 - o avantage : faible résistance car conductivité ionique de l'ordre de $800\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ [10]
 - o inconvénient : faible tension (environ 1V)
- électrolyte organique
 - o avantage : tension plus élevée (environ 3V)
 - o inconvénients : résistance élevée car conductivité ionique de l'ordre de $10\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ [10] et utilisation, pour l'électrolyte, d'acétonitrile (cyanure de méthyle), composé inflammable et nocif pour la santé

Les supercondensateurs à électrodes en métaux nobles sont encore peu utilisés car très chers mais ils présentent l'avantage d'avoir une très faible résistance interne en solution acide H_2SO_4 . Enfin, des supercondensateurs à base de polymères à conduction électronique sont en cours de développement. Les principaux inconvénients de cette technologie récente sont un coût très élevé et un problème de cyclabilité [10].

| Technologie | Electrodes | Charbon actif | Charbon actif | Charbon actif | Oxyde de métal | Polymère conducteur |
|----------------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------------|
| | Electrolyte | Aqueux | Organique | Solide | Aqueux | Organique |
| Densité d'énergie | [Wh.kg ⁻¹] | 0,2 à 2 | 1 à 5 | 1 à 5 | 2 à 10 | 2 à 10 |
| Densité de puissance | [kW.kg ⁻¹] | 1 à 5 | 0,2 à 2 | 0.1 à 0.5 | 1 à 10 | 0.1 à 0.5 |
| Tension | [V] | 0,8 à 1.2 | 2 à 3 | 2 à 3 | 0,8 à 1,2 | 0,8 à 1,3 |
| Cyclabilité | | > 100 000 | > 100 000 | > 10 000 | > 50 000 | > 10 000 |
| Coût | | faible | faible | moyen | élevé | moyen |

TABLEAU I-3 : CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE SUPERCONDENSATEUR [5]

2.2.4 GRANDEURS CARACTERISTIQUES

Les caractéristiques d'un supercondensateur définies ci-après sont relatives à leurs performances électriques.

La charge d'un supercondensateur est donnée par la relation suivante :

$$Q_{sc} = \int I \cdot dt \quad \text{I-5}$$

Avec : Q_{sc} : charge du supercondensateur [C]
 I : intensité dans le supercondensateur [A]
 t : temps [s]

La capacité d'un supercondensateur est donnée par la relation suivante :

$$C_{sc} = Q_{sc}/U \quad \text{I-6}$$

Avec : C_{sc} : capacité du supercondensateur [F]
 Q_{sc} : charge du supercondensateur [C]
 U : tension aux bornes du supercondensateur [V]

L'énergie stockée dans un supercondensateur est proportionnelle à sa capacité, suivant la relation :

$$W_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U^2 \quad \text{I-7}$$

Avec : W_{sc} : énergie stockée dans le supercondensateur [J]
 C_{sc} : capacité du supercondensateur [F]
 U : tension aux bornes du supercondensateur [V]

La puissance maximale restituée par un supercondensateur est donnée par la relation suivante :

$$P_{sc,max} = \frac{U^2}{4 \cdot ESR} \quad \text{I-8}$$

Avec : $P_{sc,max}$: puissance maximale dans le supercondensateur [W]
 ESR : résistance interne du supercondensateur [Ω]
 U : tension aux bornes du supercondensateur [V]

Les caractéristiques citées précédemment sont les caractéristiques principales d'un supercondensateur, selon [10]. D'autres caractéristiques, telles que les notions de profondeur de décharge, de rendement énergétique, ainsi que le diagramme Energie/Puissance, sont données au paragraphe V.1.1.1.

2.2.5 PROPRIETES

Les propriétés d'un supercondensateur sont :

- une capacité élevée (de quelques Farad jusqu'à plusieurs milliers de Farad)
- une tenue en tension faible limitée par la présence d'un électrolyte (entre 1V en milieu aqueux jusqu'à 3,5V en milieu organique) [10]
- une puissance spécifique comprise entre 800 et 2000W.kg⁻¹ [1], [5]
- une densité énergétique massique supérieure à celle des condensateurs et de l'ordre de 5 à 15Wh.kg⁻¹ [1] : 15Wh.kg⁻¹ pour les matériaux nobles et autour de 5Wh.kg⁻¹ pour les matériaux carbonés [5]
- une densité énergétique volumique comprise entre 1 et 10Wh.L⁻¹ [5]
- une constante de temps pour la décharge faible compte tenu du faible déplacement des ions dans l'électrolyte [1]. La décharge d'un supercondensateur s'effectue en quelques secondes, voire quelques dizaines de secondes [5].

Les supercondensateurs, tout comme les systèmes « directs » de stockage de l'énergie électrique, sont considérés comme des moyens de stockage à haute puissance spécifique et à faible énergie spécifique [11].

La tension de fonctionnement est généralement de quelques Volt par élément. La mise en série d'éléments est donc indispensable pour atteindre les tensions nécessaires aux applications de forte puissance. Il est évident que la mise en série de plusieurs supercondensateurs diminue la capacité et augmente la résistance interne de l'ensemble. Une association en série et en parallèle des supercondensateurs doit être envisagée pour répondre au cahier des charges. En effet, la mise en série permet d'atteindre un niveau de tension en concordance avec l'application finale et l'association parallèle permet d'augmenter la capacité résultante (voir détails en V.1.1.2). La Figure I-6 présente le diagramme de Ragone et le diagramme « toile d'araignée » pour les supercondensateurs.

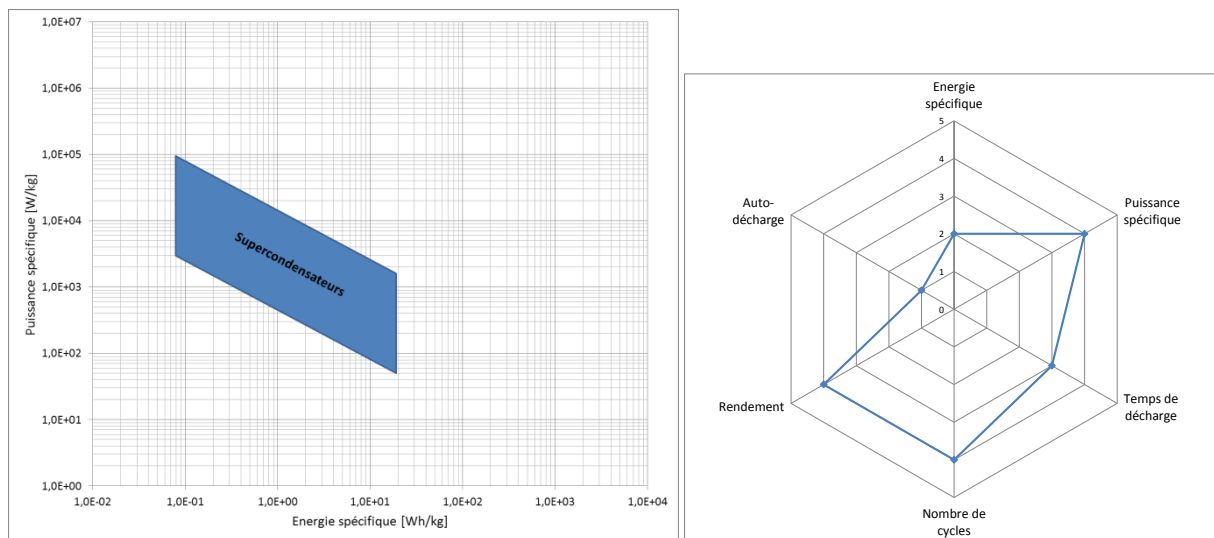


FIGURE I-6 : DIAGRAMMES DE RAGONE ET TOILE D'ARAIGNEE - SUPERCONDENSATEURS

Le rendement ou efficacité, défini par la fraction d'énergie effectivement récupérée lors de la décharge par rapport à l'énergie stockée, est relativement élevé et compris entre 95 et 98% [1], [10], [11].

Les supercondensateurs ont de très bonnes performances en termes de cyclage, de par leur constante de temps plus petite que celle d'un accumulateur électrochimique. En effet, l'énergie stockée dans un supercondensateur l'est sous forme électrostatique. Sa restitution ne fait pas intervenir de réaction chimique, contrairement à un accumulateur électrochimique, d'où un meilleur comportement dynamique (charge/décharge) [1]. Le nombre de cycles réalisé par un supercondensateur est très supérieur à celui d'un accumulateur. Il est de 100 000 à 1 million de cycles pour un supercondensateur selon [7], 500 000 selon le constructeur Maxwell [12]. Pour comparaison, le nombre de cycles moyen pour un accumulateur électrochimique est de 1000 cycles [1].

La durée de vie des supercondensateurs est relativement importante (de 8 à 10 ans). Néanmoins elle dépend des conditions dans lesquelles les supercondensateurs sont utilisés. La durée de vie d'un supercondensateur est influencée par un certain nombre de facteurs tels que la température de fonctionnement, la tension d'utilisation, le cyclage [13], [14].

Un supercondensateur est sensible à l'autodécharge, de par la nature de ses électrodes et de son électrolyte [11]. En effet, l'existence d'impuretés oxydo-réductrices dans l'électrolyte ou à la surface des électrodes carbonées et la décomposition de l'électrolyte sont à l'origine des fuites (courant de fuite) qui créent le phénomène d'autodécharge [8], [10]. Rappel : l'autodécharge est la consommation plus ou moins rapide de l'énergie stockée pour revenir à un état d'équilibre thermodynamique du système (état déchargé). L'autodécharge est estimée à environ 5% par jour, ce qui est très important.

2.2.6 APPLICATIONS

D'après [8], le supercondensateur peut être utilisé comme une source de puissance ou d'énergie :

- une source de puissance, capable de fournir une puissance importante sur une durée courte, en complément d'accumulateurs.
- une source d'énergie, dans une moindre mesure, en remplacement des accumulateurs. L'avantage ici est qu'un supercondensateur assure un meilleur fonctionnement qu'un accumulateur dans le sens où il garantit un nombre de cycles plus élevé et de meilleures performances à basses températures.

Les supercondensateurs sont essentiellement considérés comme une source de puissance, et une source d'énergie limitée. Cependant, la mise au point de nouveaux matériaux (matériaux nobles tels que RuO_2 , ...) permet d'atteindre une performance en termes d'énergie massique de l'ordre de 15Wh.kg^{-1} , ce qui équivaut à la densité d'énergie d'un accumulateur au plomb (l'énergie spécifique d'un accumulateur au plomb est typiquement compris entre 15 et 40Wh.kg^{-1} , voir le paragraphe I.3.1.3.1).

Les supercondensateurs sont utilisés dans diverses applications [10] :

- sauvegarde de mémoire dans des systèmes électriques sous faible tension (pallier la défaillance d'un système électrique ou une coupure de courant en supplantant la source déficiente pendant quelques minutes, voire quelques heures).
- source de puissance sous tension élevée (compléter un ensemble de sources en assurant un rôle de tampon vis-à-vis des appels de puissance)
- stockage dans des dispositifs embarqués ou isolés (stocker l'énergie électrique en mettant en avant la rapidité de recharge ; cependant l'énergie spécifique des supercondensateurs étant faible, cela nécessite des volumes importants de composants)

Les domaines d'application [15] sont donc l'automobile (avec l'avènement des Véhicules Electriques et Hybrides), le transport collectif urbain (aide aux démarrages et récupération de l'énergie au freinage), l'industrie (pour les systèmes de secours, ...), l'électronique domestique (également pour la sauvegarde mémoire) et l'aéronautique.

Les principaux fabricants sont Maxwell (Suisse), Batscap – Bolloré (France), Pinnacle (USA), NEC/TOKIN, Panasonic (Japon), Nesscap (Corée), Nippon Chem-Con (Chine), ESMA (Russie).

Des travaux sont poursuivis sur les matériaux dans le but d'augmenter la densité d'énergie des supercondensateurs. Certains d'entre eux sont relatifs au remplacement des matériaux à base de charbon actif par des matériaux inorganiques ou organiques. D'autres travaux émergent sur l'hybridation d'électrodes dans les supercondensateurs. Cela consiste à modifier une des électrodes, en impliquant notamment des matériaux mis au point sur des accumulateurs au lithium (LiFePO_4 par exemple) [16].

2.3 SMES (SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE)

Les bobines supraconductrices (ou SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage) sont des éléments de stockage magnétique, direct, considérés comme des sources de puissance très élevée.

Le stockage d'énergie magnétique est un des rares moyens de stocker directement l'électricité. L'utilisation d'éléments supraconducteurs SMES est nécessaire pour ce type de stockage.

2.3.1 ORIGINE / HISTORIQUE

Le SMES est une invention française [17] : l'utilisation d'un enroulement supraconducteur pour stocker de l'énergie électrique a été proposée par M. Ferrier dans les années 1970.

2.3.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le stockage de l'énergie dans un SMES est fait sous forme de champ magnétique, créé par la circulation d'un courant continu dans une bobine supraconductrice, présentant une résistance électrique nulle. Ainsi, si la

bobine supraconductrice est refermée sur elle-même, le courant qui la parcourt se maintient [5], car les pertes par effet Joule sont nulles ou négligeables.

Un SMES est composé d'enroulements supraconducteurs dont la résistance est nulle dans certaines conditions de température et d'induction.

2.3.3 TECHNOLOGIES

Il existe plusieurs catégories de supraconducteurs, classées en fonction de leur température critique :

- SBTC (Supraconducteur à Basse Température Critique) : NbTi fonctionnant à très basse température (4K), nécessitant un réfrigérant type Hélium liquide (à 4,2K), sous un champ magnétique nominal de l'ordre de 5T [5], [17]. Ces supraconducteurs BTC admettent une induction critique de 10T [18].
- SMTC (Supraconducteur à Moyenne Température Critique) : Nb₃Sn, Nb₃Al, Nb₃Ge, MgB₂ fonctionnant autour de 20 à 30K sous un champ magnétique nominal de l'ordre de 10 T [17]. Ces supraconducteurs MTC admettent une induction critique supérieure à 20T [18].
- SHTC (Supraconducteur à Haute Température Critique) : YBaCuO fonctionnant à 92K, permettant un réfrigérant type Azote liquide (à 77K), sous un champ magnétique nominal de l'ordre de 10T [17]. Ces supraconducteurs HTC admettent une induction critique de 15T [18].

2.3.4 GRANDEURS CARACTERISTIQUES

L'énergie stockée dans un SMES est proportionnelle à son inductance, suivant la relation :

$$W_L = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad \text{I-9}$$

Avec : W_L : énergie stockée dans le SMES [J]

L : inductance du SMES [H]

I : courant dans le SMES [A]

2.3.5 PROPRIETES

Les propriétés d'un SMES sont :

- induction magnétique nominale de 5 à 10T (inférieure à l'induction critique intrinsèque au matériau)
- puissance spécifique très élevée (> 1kW.L⁻¹) [5]
- densité énergétique volumique de l'ordre de 4Wh.dm⁻³ pour une induction magnétique de 6T [18]

La Figure I-7 présente le diagramme de Ragone et le diagramme « toile d'araignée » pour les SMES.

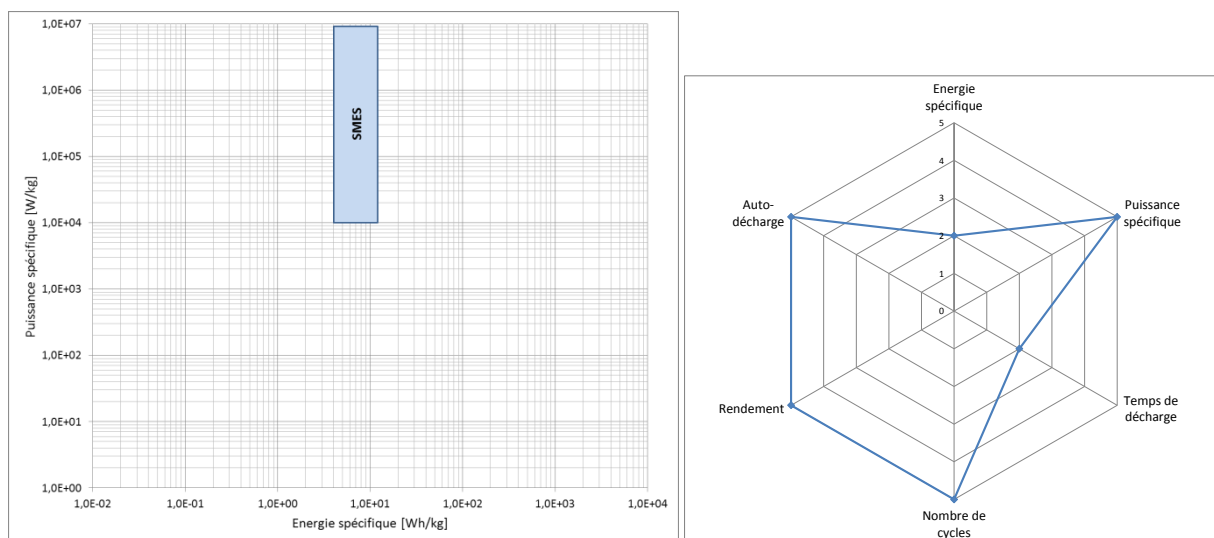


FIGURE I-7 : DIAGRAMMES DE RAGONE ET TOILE D'ARAIGNEE - SMES

Les avantages des SMES [1] sont :

- une énergie utile proche de l'énergie maximale stockée, soit un rendement énergétique proche de 1
- un rendement instantané (du système complet, c'est-à-dire comprenant l'installation cryogénique) très élevé, entre 95% et 98% [5], [11], [18]
- pas d'autodécharge car les pertes sont nulles, ce qui permet un stockage long [11]
- une constante de temps pour la décharge très faible (< 100ms), favorable pour les applications type stabilisation/régulation du réseau
- une durée de vie élevée (20 à 30 ans) [5] : nombre de cycles de charge/décharge quasiment infini [11], [18]

Leurs inconvénients sont les suivants :

- ce moyen de stockage nécessite une ambiance cryogénique qui, bien qu'elle ne soit pas un problème technologique, rend complexe l'exploitation globale du système (fonctionnement et maintenance) [1], [11].
- la faisabilité des bobines (tores ou solénoïdes) : les dimensions sont très impressionnantes pour des applications de puissance significative. Les quelques exemples suivants sont l'illustration de l'encombrement imposant des applications SMES : un tore de 11,4MWh pesant 5600 tonnes ou un solénoïde de 722kWh pesant 225 tonnes [17], ou encore des anneaux supraconducteurs de diamètre supérieur à 1km.

2.3.6 APPLICATIONS

Les SMES sont principalement connectés au réseau [17], non pas pour un stockage massif d'énergie, mais plutôt pour stabiliser dynamiquement et transitoirement le réseau. Par exemple, une bobine de 30MJ associée à un convertisseur de 10MVA a été testée à titre expérimental en 1983 et abandonnée en 1984, sur le réseau BPA (Bonneville Power Administration) aux Etats-Unis [19]. Des micro-SMES sont utilisés pour le lissage des creux de tension (sources non interruptibles). Ces systèmes sont commercialisés et présentent les caractéristiques suivantes : énergie stockée de 3MJ, puissance du convertisseur associé de 1MVA. Enfin, les SMES peuvent être utilisés comme source impulsionnelle, par exemple un lanceur électromagnétique pour application militaire est en développement avec des supraconducteurs à haute température. Les applications de stockage magnétique restent relativement peu nombreuses et onéreuses. On retrouve deux applications essentiellement aux Etats-Unis (une application de 30MJ et une de 18TJ), quelques-unes en Europe et au Japon [19]. Le coût et l'énergie ne sont pas liés par une relation linéaire : on l'estime à 1M€/kWh pour une application de l'ordre de 1kWh et 300€/kWh pour une application de l'ordre de 1GWh [20].

2.4 VOLANTS D'INERTIE

Les volants d'inertie sont des éléments de stockage mécanique, indirect, considérés comme des sources de puissance élevée.

L'énergie électrique peut, après transformation, être stockée sous forme d'énergie mécanique : potentielle (pesanteur) ou inertielle (cinétique). L'énergie potentielle étant principalement liée à la génération centralisée de l'énergie électrique, le paragraphe suivant portera sur le stockage par énergie cinétique et particulièrement sur le volant d'inertie.

2.4.1 ORIGINE / HISTORIQUE

L'idée de stocker de l'énergie à l'aide d'un mobile en mouvement est ancienne (plusieurs milliers d'années). Le premier brevet concernant le volant d'inertie a été déposé en 1868 par Louis Guillaume Perreux de l'Orne [21]. C'est au XX^{ème} siècle que le volant d'inertie sera étudié avec intérêt pour le stockage de l'énergie sous forme cinétique.

2.4.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'énergie électrique est utilisée pour accélérer un volant entraîné par une machine électrique (en fonctionnement moteur). Le stockage de l'énergie est alors réalisé sous forme cinétique de rotation. L'énergie stockée est restituée par la machine électrique (en fonctionnement générateur) entraînée par le volant d'inertie. Le dispositif est donc constitué d'un volant d'inertie + paliers, d'une machine électrique, d'une électronique de puissance associée et d'une enceinte de protection.

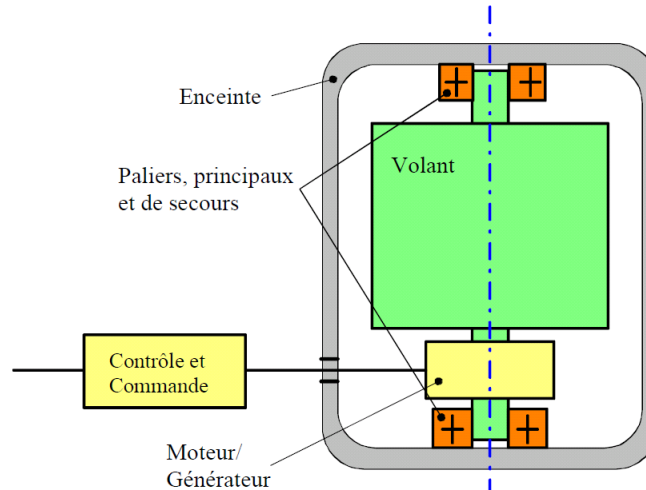


FIGURE I-8 : STRUCTURE D'UN ACCUMULATEUR D'ENERGIE ELECTROMECHANIQUE [22]

2.4.3 TECHNOLOGIES

Pour le volant, plusieurs matériaux peuvent être utilisés, en fonction des contraintes mécaniques notamment [21] :

| Matériau | Densité énergétique [Wh.kg ⁻¹] |
|------------|--|
| Aciers | Entre 30 et 70 |
| Aluminium | Entre 30 et 60 |
| Titane | Entre 55 et 80 |
| Composites | Entre 135 et 285 |

TABLEAU I-4 : CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE VOLANT D'INERTIE

En ce qui concerne le moteur/générateur, plusieurs types de machines peuvent être associés au volant d'inertie : Machine Asynchrone (MAS), Machine Synchrone (MS), MS à aimants permanents (MSAP), MS à reluctance variable (MSRV), ... Le choix de la machine se fait suivant les critères suivants : vitesse de rotation, rendement en charge et en décharge, bruits mécaniques, coût, ...

Concernant les paliers, on distingue deux types de contacts : mécanique (réalisé par paliers à billes) et magnétique (paliers actifs, passifs ou supraconducteurs). Les paliers mécaniques sont les plus utilisés car leur coût est plus faible que les paliers magnétiques. Cependant, ils sont sensibles à l'usure mécanique et génèrent des pertes non négligeables. Les dispositifs à suspension magnétique sont nécessaires dès que les durées de stockage dépassent 24 heures.

Enfin l'enceinte de confinement est nécessaire pour assurer la protection de l'environnement en cas de défaillance du volant. Elle doit présenter des propriétés de tenue mécanique élevées car elle maintient les paliers et doit supporter la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur (le vide est nécessaire dans l'enceinte pour limiter les effets aérodynamiques à vitesse élevée).

2.4.4 GRANDEURS CARACTERISTIQUES

L'énergie stockée dans un volant d'inertie est proportionnelle à son moment d'inertie, suivant la relation :

$$W_{VI} = \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2 \quad \text{I-10}$$

Avec : W_{VI} : énergie stockée dans le volant d'inertie [J]

J : moment d'inertie [kg.m²]

Ω : vitesse de rotation du volant d'inertie [rad.s⁻¹]

Si le volant d'inertie est considéré comme un cylindre mince (c'est-à-dire dans le cas où on peut assimiler le rayon extérieur au rayon intérieur du cylindre), on a les relations suivantes :

$$\varepsilon_M = \frac{1}{2} v_{ext}^2 \quad \text{I-11}$$

$$\varepsilon_V = \frac{1}{2} \rho_{VI} \cdot v_{ext}^2 \quad \text{I-12}$$

Avec : ε_M : densité énergétique massique [J.kg⁻¹]

ε_V : densité énergétique volumique [J.m⁻³]

v_{ext} : vitesse périphérique du cylindre mince [m.s⁻¹]

ρ_{VI} : masse volumique du volant [kg.m⁻³]

L'énergie maximale stockée dans un volant d'inertie est :

$$W_{VI_{max}} = \frac{1}{2} J \cdot \Omega_{max}^2 \quad \text{I-13}$$

Il est d'usage de faire fonctionner le volant d'inertie à une vitesse comprise entre la vitesse maximale et la moitié de celle-ci. L'énergie récupérée sur cette plage de vitesse est égale à 75% de l'énergie maximale stockée (Figure I-9):

$$W_{VI_{utile}} = \frac{1}{2} J \cdot \Omega_{max}^2 - \frac{1}{2} J \cdot \left(\frac{\Omega_{max}}{2}\right)^2 = \frac{3}{4} W_{VI_{max}} \quad \text{I-14}$$

Avec : $W_{VI_{utile}}$: énergie utile restituée par le volant d'inertie [J]

$W_{VI_{max}}$: énergie maximale stockée dans le volant d'inertie [J]

Ω_{max} : vitesse de rotation maximale du volant d'inertie [rad.s⁻¹]

2.4.5 PROPRIETES

Les propriétés d'un volant d'inertie sont les suivantes :

- la densité énergétique massique d'un volant d'inertie peut atteindre 100Wh.kg⁻¹ si l'on considère le volant seul, en matière composite permettant d'atteindre une vitesse périphérique élevée (de l'ordre de 1000m.s⁻¹). Si on considère le volant d'inertie avec son environnement (paliers, enceinte de confinement, moteur/générateur, ...), la densité d'énergie massique chute entre 5 et 25Wh.kg⁻¹.
- la densité de puissance massique peut atteindre jusqu'à 2kW.kg⁻¹ [22]
- la durée de décharge est de l'ordre de la minute pour une application impulsioneille et de l'ordre de l'heure pour une application de lissage de charge par exemple.

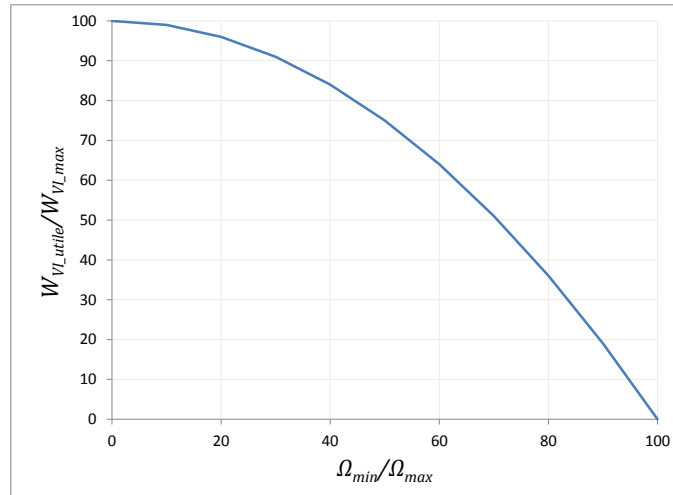


FIGURE I-9 : CARACTERISTIQUE DE DECHARGE D'UN VOLANT D'INERTIE EN FONCTION DE SA VITESSE DE ROTATION

La Figure I-10 présente le diagramme de Ragone et le diagramme « toile d'araignée » pour le système à volant d'inertie.

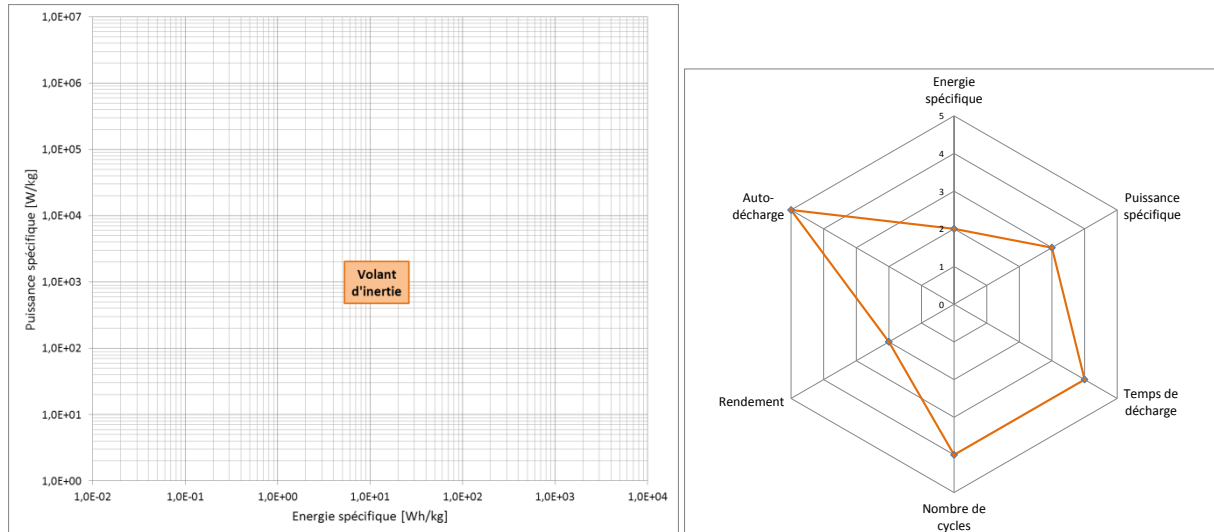


FIGURE I-10 : DIAGRAMMES DE RAGONE ET TOILE D'ARAIGNEE – SYSTEME VOLANT D'INERTIE

2.4.6 APPLICATIONS

Les volants d'inertie sont utilisés pour des moyens de transport (train, tramway, bus), notamment pour récupérer l'énergie de freinage et dans des applications stationnaires pour des alimentations non interruptibles ou du lissage de charge [23]. Certains dispositifs sont commercialisés dans ces deux applications. Les problématiques de sûreté de fonctionnement sont à prendre en considération pour ce dispositif. Pour les applications stationnaires, il est courant d'enterrer le dispositif pour anticiper le risque de dégradation en cas de rupture mécanique. Les volants les plus performants en termes d'énergie spécifique sont ceux en matériaux composites, qui sont également les plus chers. Le coût du kilo-Watt diffère suivant l'application : pour un volant impulsif (de 100W.kg^{-1} à quelques kW.kg^{-1}), on l'estime entre 150 et 250€/kW ; pour un volant de lissage (de quelques Wh.kg^{-1} à 25Wh.kg^{-1}), on l'estime entre 30 à 80€/kW [24]. L'aspect système pour ce moyen de stockage est très important dans la mesure où les performances du volant rapportées au système complet sont bien inférieures à celles du volant seul.

3 LES ELEMENTS DE STOCKAGE COMME DES SOURCES D'ENERGIE

Les moyens de stockage considérés comme des sources d'énergie sont des dispositifs capables de fournir une certaine puissance pendant un temps relativement long au vu de l'Application. Ci-après sont donc présentés des SSE que l'on identifie comme source d'énergie compte tenu des temps de mission d'un aéronef, à savoir :

- les accumulateurs électrochimiques (notamment les accumulateurs au plomb, au nickel et au lithium)
- le système {Pile à Combustible + stockage Hydrogène + Electrolyseur}

3.1 ACCUMULATEURS ELECTROCHIMIQUES

Dans les accumulateurs électrochimiques, l'énergie est stockée sous une forme électrochimique, ce qui nécessite une conversion (réaction électrochimique) pour stocker ou restituer de l'énergie électrique (stockage indirect). Ces dispositifs sont des sources d'énergie, dont la densité d'énergie est supérieure à celle des sources de puissance et peut varier notablement en fonction de la technologie. Dans ce paragraphe, les technologies au plomb, nickel et lithium sont présentées, dans l'ordre de la moins à la plus performante énergétiquement et récente historiquement. Ces trois technologies sont les plus employées dans les applications embarquées.

Un accumulateur est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement. Cette conversion d'énergie est réversible pour un accumulateur, contrairement à une pile. Le terme de batterie est utilisé pour définir un ensemble d'accumulateurs électrochimiques.

3.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une cellule d'accumulateur électrochimique est composée de deux électrodes (conducteurs électroniques) et d'un électrolyte (conducteur ionique et isolant électronique). Les réactions chimiques sont spontanées dans un accumulateur et mettent en jeu deux couples d'oxydoréduction de potentiels différents.

Durant la décharge de l'accumulateur, l'électrode positive (cathode) est le siège d'une réaction de réduction du couple de plus haut potentiel et l'électrode négative (anode) est le siège d'une réaction d'oxydation du couple de plus faible potentiel.

Durant la charge, le phénomène s'inverse : l'électrode positive (anode) s'oxyde et l'électrode négative (cathode) se réduit.

Par convention, on note généralement la réaction chimique d'oxydoréduction dans le sens de la décharge (\rightarrow), la flèche inverse étant le sens de la charge (\leftarrow).

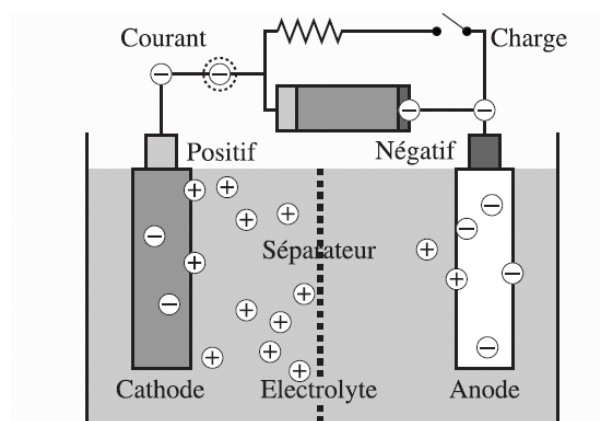


FIGURE I-11 : SCHEMA DE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ACCUMULATEUR ELECTROCHIMIQUE [7]

3.1.2 GRANDEURS CARACTERISTIQUES

La tension électrique, ou appelée également force électromotrice (f.e.m.), aux bornes d'un accumulateur est fixée par la différence de potentiel d'oxydoréduction entre les deux couples redox utilisés. Elle est de l'ordre de quelques Volt par élément. Pour obtenir des tensions supérieures, il suffit d'associer en série plusieurs cellules, formant ainsi une batterie d'accumulateurs (Cf. paragraphe V.1.2.2).

On détermine le potentiel de chaque électrode grâce à la relation de Nernst (VII-1), qui donne la relation entre la valeur de potentiel relatif du couple dans un état quelconque non standard et le potentiel relatif standard.

La tension à vide théorique d'un générateur électrochimique est déterminée par l'équilibre thermodynamique de chacune de ses deux électrodes :

$$E = E_+^0 - E_-^0 \quad \text{I-15}$$

Avec : E_+^0 : potentiel standard de l'électrode positive [V]

E_-^0 : potentiel standard de l'électrode négative [V]

La capacité (ou encore charge) correspond à la quantité de charge que l'accumulateur peut restituer (sous une tension connue) pendant un temps de décharge. Elle s'exprime en Ah ou en Coulomb [C] (SI)³.

On note C_h le courant pour charger ou décharger l'accumulateur en h heures. Par exemple, C_5 ou C/5 pour un accumulateur de 10Ah désigne un courant de charge ou de décharge de 2A. 10C correspond pour le même accumulateur à un courant de 100A.

On distingue la capacité théorique d'une électrode de celle d'un accumulateur. La capacité d'une électrode est donnée par la loi de Faraday (VII-2). La capacité théorique d'un accumulateur est la plus petite des valeurs de capacité théorique des deux électrodes.

$$C_{acc.th} = \min (C_+ ; C_-) \quad \text{I-16}$$

Avec : $C_{acc.th}$: capacité théorique de l'accumulateur [C]

C_+ : capacité maximale théorique de l'électrode positive [C]

C_- : capacité maximale théorique de l'électrode négative [C]

Il est rare que la capacité soit équilibrée entre les deux masses actives. Dans un accumulateur Leclanché, le boîtier est en zinc donc sur-capacitif par rapport au dioxyde de manganèse. Dans les accumulateurs étanches au plomb, la masse négative est sur-capacitive pour permettre la recombinaison d'oxygène lors de la surcharge sans risque de dégagement d'hydrogène.

La capacité théorique spécifique d'un accumulateur est la capacité de l'accumulateur ramenée à sa masse ou à son volume. Cette caractéristique permet de comparer différents accumulateurs entre eux. Néanmoins, il faut s'assurer que les bases de comparaison sont les mêmes pour tous les accumulateurs (matériaux électro-actifs seuls ou l'accumulateur complet). Il existe un facteur 3 à 7 entre la capacité théorique du couple anode-cathode et la capacité pratique lors de la réalisation de la batterie d'accumulateurs.

L'état de charge (appelé SOC : State Of Charge) représente la capacité disponible restante dans un accumulateur, exprimée sous forme de pourcentage de la capacité évaluée [25].

$$SOC = SOC_0 - \frac{C_u}{C_n} \quad \text{I-17}$$

Avec : SOC : état de charge de l'accumulateur [%]

SOC_0 : état de charge initial de l'accumulateur [%]

C_u : capacité utile de l'accumulateur (positive en décharge, négative en charge) [Ah]

C_n : capacité nominale de l'accumulateur [Ah]

³ Rappel : 1 Ah = 3600 C

La profondeur de décharge (appelée DOD : Depth Of Discharge) est le ratio de la capacité utile sur la pleine capacité de l'accumulateur.

$$DOD = \frac{C_u}{C_n} \quad \text{I-18}$$

Avec : DOD : profondeur de décharge de l'accumulateur [%]

Par exemple : si un accumulateur de 100Ah (pleine capacité) voit sa capacité diminuer de 25Ah, alors sa profondeur de décharge (DOD) est de 25% et son état de charge (SOC) est de 75%.

L'énergie stockée dans un accumulateur électrochimique est le produit de la charge ou capacité avec la tension à vide, comme donné dans la relation suivante :

$$W_{acc} = C_{acc} \cdot E_0 \quad \text{I-19}$$

Avec : W_{acc} : énergie stockée dans l'accumulateur [J] ou [Wh]

C_{acc} : capacité pratique de l'accumulateur [C] ou [Ah]

E_0 : tension à vide de l'accumulateur [V]

La densité énergétique massique [Wh.kg^{-1}] ou énergie spécifique correspond à l'énergie que peut restituer un accumulateur par rapport à sa masse. La densité énergétique volumique [Wh.L^{-1} ou Wh.dm^{-3}] correspond à l'énergie que peut restituer l'accumulateur par rapport à son volume.

D'autres caractéristiques sur les accumulateurs, telle que la notion de rendement faradique, ainsi que des précisions sur le diagramme Energie/Puissance, sont données au paragraphe V.1.2.1.

L'autodécharge correspond à la perte progressive de la capacité d'un accumulateur laissé au repos. Cette perte s'explique par les réactions secondaires qui ont lieu dans l'accumulateur ; ces réactions étant dues à l'instabilité de l'électrolyte au contact des matières actives, à la circulation d'espèces chimiques entre les deux électrodes ou encore à la diminution de la résistance d'isolement électronique du séparateur [26]. Ce phénomène dépend donc fortement de la température de l'accumulateur hors fonctionnement [27].

L'effet mémoire est un phénomène physico-chimique qui affecte les performances d'un accumulateur. Il a pour conséquence de limiter l'échange d'énergie entre l'accumulateur et son environnement, donc d'entraîner une diminution de la capacité nominale de l'accumulateur. L'effet mémoire est observé lorsque l'on ne décharge pas complètement un accumulateur et que l'on arrête sa décharge toujours au même niveau de tension de décharge (cas notamment des équipements électroniques qui détectent la tension d'alimentation). L'accumulateur « enregistre » alors ce niveau de décharge et la restitution de l'énergie encore disponible dans l'accumulateur devient difficile. Pour appréhender l'effet mémoire, une analogie peut être faite avec le réservoir d'un véhicule, dont une partie serait obstruée, ne permettant pas de récupérer tout le carburant qui est pourtant stocké dans le réservoir. L'effet mémoire concerne particulièrement les accumulateurs de technologie au nickel. Les accumulateurs de technologie au plomb ou lithium ne sont pas sensibles à l'effet mémoire.

Pour certains accumulateurs, il ne faut pas forcer la décharge au-delà de la décharge complète sinon on observe un dégagement d'hydrogène sur l'électrode positive, d'où une surpression [26] problématique d'un point de vue sécurité d'utilisation.

Dans le cas où on est en présence d'une batterie d'accumulateurs, il est primordial que les accumulateurs soient homogènes (en termes d'état de charge). Si on associe des accumulateurs chargés avec des accumulateurs déchargés, on risque de prolonger la décharge de ces derniers au-delà de sa limite de décharge. Une période de charge et de décharge est appelée un cycle. Les performances en terme de durabilité (ou durée de vie) d'un accumulateur s'évaluent en nombre de cycles qu'il peut fournir à une profondeur de décharge déterminée.

3.1.3 TECHNOLOGIES

Il existe diverses technologies d'accumulateurs électrochimiques. Dans les paragraphes suivants est donnée une description des technologies suivantes :

- Accumulateurs au plomb
- Accumulateurs au nickel (Ni-Cd, Ni-MH, Ni-Zn)
- Accumulateurs au lithium (Li-métal, Li-ion, LiP, LiPo)

3.1.3.1 ACCUMULATEURS AU PLOMB

L'accumulateur Plomb-acide a été inventé par Gaston Planté en 1859. On distingue différentes technologies d'électrode d'une part (plaques planes ou plaques tubulaires) et d'électrolyte d'autre part (liquide ou gélifié), donnant lieu à une dénomination : batterie ouverte et batterie fermée/étanche (ou batterie à recombinaison, en anglais Valve Regulated Lead Acid battery, VRLA battery) [28].

Composition électrochimique

- Electrode négative : Pb
- Electrode positive : PbO₂
- Electrolyte : H₂SO₄ (l'électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique)
- Réaction électrochimique [26] :



Généralement pour les accumulateurs au plomb, on n'autorise pas une profondeur de décharge supérieure à 80% pour éviter le phénomène de sulfatation de l'accumulateur [7]. En effet, la concentration d'acide sulfurique varie pendant la charge et la décharge. Dans le cas d'une décharge profonde, elle peut être telle que les électrodes sont attaquées, donnant du sulfate de plomb. On dit alors que l'accumulateur se sulfate. Il devient inutilisable car le phénomène n'est pas réversible.

| | |
|-------------------------------|---|
| Tension à vide | 2 - 2,1V |
| Capacité spécifique théorique | 120Ah.kg ⁻¹ |
| Capacité spécifique pratique | 7 à 20Ah.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique massique | 15 – 40Wh.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique volumique | 40 – 100Wh.dm ⁻³ |
| Durée de vie | nombre de cycles = 200 – 400 en version étanche, 600 – 1000 en version tubulaire |
| Températures d'utilisation | de -20°C à +60°C |
| Rendement faradique global | entre 85 et 90% |
| Autodécharge | de l'ordre de 0,5% par jour |

TABLEAU I-5 : CARACTERISTIQUES D'UN ELEMENT ACCUMULATEUR PLOMB-ACIDE [26], [27], [29], [30]

L'avantage de l'accumulateur au plomb est son faible coût (< 1€/kWh restitué [7]).

Ses inconvénients sont les suivants :

- une faible densité énergétique massique car sa masse est élevée
- un faible courant de charge
- l'utilisation d'un liquide corrosif (pour l'électrolyte)
- la toxicité due au plomb (recyclage), métal lourd concerné par la directive européenne 2006/66/CE, relative aux piles et accumulateurs et à leurs déchets, interdisant la mise sur le marché de piles ou accumulateurs contenant des substances dangereuses (plomb, cadmium)

Les fabricants sont : Johnson Controls/Varta (USA), Panasonic (Japon), Power Sonic (USA), Huanyu Power Sources (Chine), Moll-Battieren (Allemagne), Exide technologies (USA), Leclanché (Suisse) et Steco (France).

L'accumulateur au plomb est l'un des plus employés dans l'industrie (notamment dans le secteur automobile pour les véhicules thermiques).

3.1.3.2 ACCUMULATEURS AU NICKEL

3.1.3.2.1 ACCUMULATEUR NICKEL-CADMIUM

L'accumulateur Nickel-Cadmium (Ni-Cd) a été découvert par Waldemar Jungner en 1900.

Composition électrochimique

- Electrode négative : Cd (solide)
Potentiel standard du couple $\text{Cd}(\text{OH})_2 / \text{Cd} : E^{\circ} = -0,809\text{V}$
- Electrode positive : $\text{NiO}(\text{OH})$ (solide)
L'oxyhydroxyde de nickel est réduit en hydroxyde de nickel au cours de la décharge.
Potentiel standard du couple $\text{NiOOH} / \text{Ni}(\text{OH})_2 : E^{\circ}_+ = +0,45\text{V}$
- Electrolyte : KOH (solution alcaline, aqueuse composée de potasse KOH, ou de soude NaOH et additionnée ou non de lithine LiOH) [26]
- Réaction électrochimique [26], [31] :



L'accumulateur est constitué de façon à éviter le dégagement d'hydrogène à l'électrode positive et à favoriser la création d'oxygène, son transfert à travers le séparateur vers l'électrode négative et sa réduction en eau (recombinaison de l'oxygène). Pour cela, on limite la capacité de l'électrode positive à la conception (excédent de capacité à l'électrode négative) [26].

| | |
|-------------------------------|---|
| Tension à vide | $E^{\circ}_+ + E^{\circ} = 1,26\text{V} \approx 1,3\text{V}$ |
| Capacité spécifique théorique | 180Ah.kg^{-1} |
| Capacité spécifique pratique | $30 \text{ à } 50\text{Ah.kg}^{-1}$ |
| Densité énergétique massique | $30 - 60\text{Wh.kg}^{-1}$ |
| Densité énergétique volumique | $80 - 160\text{Wh.dm}^{-3}$ |
| Durée de vie | nombre de cycles = entre 500 et 1000 quand la profondeur de décharge (DOD) est de 100% à chaque cycle ; entre 5000 et 10000 quand DOD est de 25% à chaque cycle |
| Températures d'utilisation | > stockage : de -30°C à $+50^{\circ}\text{C}$ > charge : de 0°C à $+45^{\circ}\text{C}$ > décharge : de -20°C à $+60^{\circ}\text{C}$ |
| Rendement faradique global | entre 75 et 80% |
| Autodécharge | de l'ordre de 2% par jour |

TABLEAU I-6 : CARACTERISTIQUES D'UN ELEMENT ACCUMULATEUR NI-CD [26], [27], [29], [30], [31]

Les avantages de l'accumulateur Ni-Cd sont :

- une grande capacité
- de bonnes performances à faible température [7]
- un bon niveau de fiabilité
- une durée de vie élevée et un faible entretien [7]
- la possibilité de charge complète rapide, de l'ordre de 15min [26], [30]

Ses inconvénients sont les suivants :

- coût : environ 1,5 fois plus chère que batterie Pb
- toxicité due au cadmium (recyclage), métal lourd concerné par la directive européenne 2006/66/CE, relative aux piles et accumulateurs et à leurs déchets, interdisant la mise sur le marché de piles ou accumulateurs contenant des substances dangereuses (plomb, cadmium)
- effet mémoire

Un accumulateur Ni-Cd soumis à un cyclage (charge/décharge) peu profond a tendance à s'adapter aux caractéristiques de ce dernier. S'il est ensuite soumis à une décharge profonde, la tension à ses bornes chute brutalement quand la capacité déchargée atteint la valeur intervenant dans le précédent cyclage. La perte de capacité n'est pas définitive. Une recharge efface cet effet mémoire et autorise les décharges profondes ultérieures. Un accumulateur Ni-Cd présente l'avantage de devoir être déchargé complètement pour rester sur le cycle majeur. On peut donc exploiter complètement l'énergie stockée, en descendant à des faibles niveaux de tensions (i.e. une forte profondeur de décharge), contrairement à d'autres accumulateurs pour lesquels une tension minimale est imposée pour des raisons de cyclabilité. En revanche, si l'accumulateur est relié au réseau via un convertisseur, la nécessité de descendre à faible tension impose des contraintes non négligeables au convertisseur (la faible tension impliquant des forts courants).

Les fabricants d'accumulateurs Ni-Cd sont Saft (France) et Varta/Johnson Controls (USA).

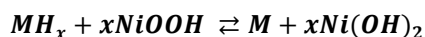
Ces accumulateurs sont employés dans l'outillage portatif, l'éclairage de sécurité et dans des applications demandant une forte puissance ou de fonctionner à une température relativement élevée. Ils sont également utilisés pour des véhicules électriques, mais leurs applications sont limitées par la directive 2006/66/CE qui interdit la mise sur le marché des piles et accumulateurs contenant plus de 0,002% de cadmium en poids.

3.1.3.2.2 ACCUMULATEUR NICKEL METAL HYDRURE

L'accumulateur Nickel Métal Hydrure (Ni-MH) a été développé dans les années 1970 pour répondre au problème du cadmium dans les accumulateurs Ni-Cd, et remplace depuis les années 1990 l'accumulateur Ni-Cd avec des niveaux de performances assez comparables. Il s'agit d'une forme dérivée des accumulateurs Ni-H₂.

Composition électrochimique

- Electrode négative : MH (il s'agit d'un alliage hydrurable, c'est-à-dire un alliage métallique capable d'absorber et de désorber l'hydrogène)
Potentiel standard du couple H₂O / H₂ : $E^0_- = -0,83V$
- Electrode positive : NiO(OH)
Potentiel standard du couple NiOOH / Ni(OH)₂ : $E^0_+ = +0,45V$
- Electrolyte : KOH (solution alcaline, aqueuse composée de potasse KOH, ou de soude NaOH et additionnée ou non de lithine LiOH) [26]
- Réaction électrochimique [26] :



I-22

Ce bilan fait apparaître un électrolyte strictement invariant [26]. La réaction électrochimique est l'échange d'un proton H⁺ entre les deux électrodes. Il s'agit donc d'un accumulateur à insertion d'hydrogène. Toutefois le proton n'est pas transféré directement en tant que tel dans l'électrolyte, mais par le biais de H₂O et OH⁻.

| | |
|-------------------------------|---|
| Tension à vide | $E^0_+ + E^0_- = 1,28V \approx 1,3V$ |
| Capacité spécifique théorique | 205Ah.kg ⁻¹ |
| Capacité spécifique pratique | 45 à 60Ah.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique massique | 60 – 90Wh.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique volumique | 200 – 350Wh.dm ⁻³ |
| Durée de vie | Nombre de cycles = 400 – 700 pour DOD = 100% |
| Températures d'utilisation | > stockage : de -30°C à +40°C > charge : de 0°C à +40°C > décharge : de -20°C à +50°C |
| Rendement faradique global | entre 90 et 95% |
| Autodécharge | de 2% à 4% par jour |

TABLEAU I-7 : CARACTERISTIQUES D'UN ELEMENT ACCUMULATEUR NI-MH [26], [27], [29]

Les avantages de l'accumulateur Ni-MH sont :

- une énergie spécifique environ 2 fois supérieure à celle de l'accumulateur Ni-Cd
- l'utilisation d'un alliage métallique à l'électrode négative est une alternative à l'utilisation du cadmium

Ses inconvénients sont les suivants :

- coût élevé
- hystérésis sur la caractéristique tension à vide en fonction de l'état de charge
- la tension en fin de décharge, qui est fixée à environ 1V, ne doit pas être dépassée car il y a risque de détérioration de l'accumulateur.

Les fabricants d'accumulateurs Ni-MH sont : Saft (France), Energizer (USA) pour l'électronique portable, Panasonic (Japon) pour l'automobile et Varta/Johnson Controls (USA).

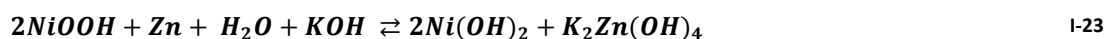
Ces accumulateurs sont employés dans des applications « Haute énergie » (électronique portable, caméscope, bureautique, jouets, instruments médicaux ou scientifiques), « Haute puissance » (machine outils, modélisme), et transport routier (VEH).

3.1.3.2.3 ACCUMULATEUR NICKEL – ZINC

L'accumulateur Nickel – Zinc (Ni-Zn) a été développé dans les années 1930, pour remplacer l'accumulateur Argent – Zinc (Ag-Zn).

Composition électrochimique

- Electrode négative : Zn
Potentiel standard de l'électrode négative : $E^0_- = -1,25V$
- Electrode positive : NiO(OH)
Potentiel standard du couple NiOOH / Ni(OH)₂ : $E^0_+ = +0,45V$
- Electrolyte : KOH
- Réaction électrochimique :



| | |
|-------------------------------|---|
| Tension à vide | $E^0_+ + E^0_- = 1,7V$ |
| Capacité spécifique théorique | $215Ah.kg^{-1}$ |
| Capacité spécifique pratique | $45Ah.kg^{-1}$ |
| Densité énergétique massique | $60-70Wh.kg^{-1}$ |
| Densité énergétique volumique | $120Wh.dm^{-3}$ |
| Durée de vie | nombre de cycles entre 600 et 1000 cycles |
| Températures d'utilisation | de $-20^\circ C$ à $+60^\circ C$ |

TABLEAU I-8 : CARACTERISTIQUES D'UN ELEMENT ACCUMULATEUR NI-ZN [32]

Les avantages de l'accumulateur Ni-Zn sont :

- son coût : moins cher que Ni-Cd
- une tension d'utilisation 25% supérieure à celle de l'accumulateur Ni-Cd
- sa robustesse et sa fiabilité (parfaitement sûr, sans maintenance, facilement recyclable)

Son principal inconvénient est sa durée de vie : il présente une mauvaise résistance au cyclage due à la solubilité du zinc dans l'électrolyte alcaline qui provoque des dendrites de zinc pouvant générer des courts-circuits entre les deux électrodes. Si le zinc entre en contact avec une particule de nickel, il y a dégagement d'hydrogène et le zinc se corrode [30].

Les fabricants d'accumulateurs Ni-Zn sont : Powergenix (USA), Evercell (USA), Xellerion (USA).

Ces accumulateurs sont employés essentiellement dans les secteurs militaire et automobile.

3.1.3.3 ACCUMULATEURS AU LITHIUM

Pour les accumulateurs au lithium, on distingue quatre technologies selon la constitution de l'électrode négative (lithium métallique ou matériau à insertion de lithium) et la composition de l'électrolyte (liquide ou polymère) [33] :

| Technologie | Li-métal | Li-ion | Li-métal polymère (LMP) | Li-ion polymère ou « plastique » |
|--------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Electrode négative | Lithium métallique | Matériau à insertion de lithium | Lithium métallique | Matériau à insertion de lithium |
| Electrolyte | Liquide | Liquide | Polymère | Polymère |

TABLEAU I-9 : TECHNOLOGIES D'ACCUMULATEURS AU LITHIUM

3.1.3.3.1 ACCUMULATEUR LITHIUM-METALLIQUE

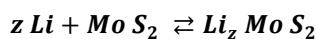
La technologie Lithium-métallique ou Lithium-métal a été commercialisée dans les années 1980.

Composition électrochimique

- Electrode négative : lithium métallique : cette technologie donne lieu à une couche de passivation (isolation des grains de métal déposés sur l'électrode) non homogène (création de dendrites générant des courts-circuits entre les deux électrodes donc des courants de fuite) [34]
- Electrode positive : composé d'insertion de lithium, ce qui permet aux ions lithium Li^+ de passer d'une électrode à l'autre [34]
- Electrolyte : l'électrolyte est une solution d'un sel de lithium dans un solvant organique ou plus favorablement un sel de LiAsF_6 (ce sel s'oppose à la création de dendrites et favorise la réversibilité du cyclage) [34]

Remarque : l'électrolyte n'est pas aqueux car le lithium est très réactif vis-à-vis de l'eau.

- Réaction électrochimique (avec une cathode à base de sulfure de molybdène) :



I-25

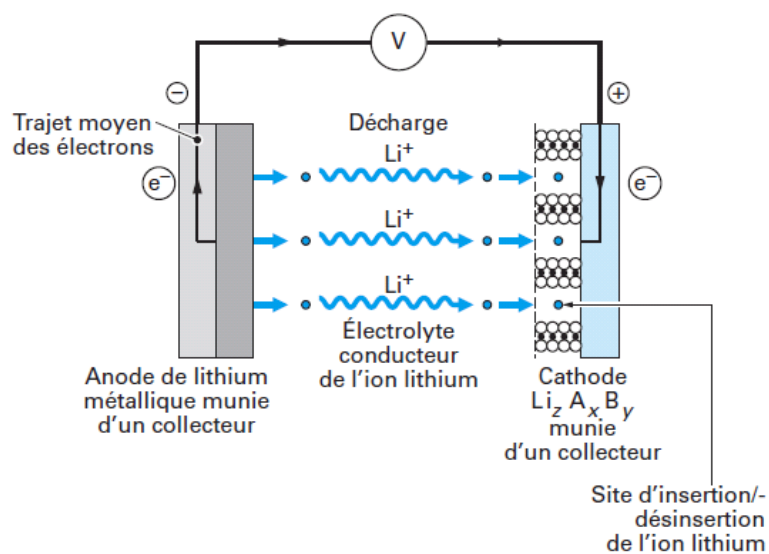


FIGURE I-12 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ACCUMULATEUR LI-METAL [34]

Durant la décharge, l'anode (ou électrode négative) est le siège d'une oxydation. Les ions Li^+ traversent l'électrolyte et vont à la cathode (ou électrode positive) subir une réduction. Les électrons produits lors de la réduction alimentent alors le circuit électrique extérieur. Durant la charge, la réaction s'inverse [7]. A l'électrode positive, il y a donc insertion de l'ion lithium lors de la charge et désinsertion lors de la décharge ; ce phénomène est appelé « rocking chair mechanism » [26].

Les inconvénients de l'accumulateur lithium-métal sont :

- un problème de sécurité (les micro courts-circuits provoqués par les dendrites peuvent provoquer une instabilité jusqu'à l'emballement thermique)
- sa charge relativement lente

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| Tension à vide | 3,5V |
| Capacité spécifique théorique | 3 862Ah.kg ⁻¹ |
| Capacité spécifique pratique | de l'ordre de 1000Ah.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique massique | 50Wh.kg ⁻¹ |
| Durée de vie | nombre de cycles = 400 |

TABLEAU I-10 : CARACTERISTIQUES D'UN ELEMENT ACCUMULATEUR LI-METAL

3.1.3.3.2 ACCUMULATEUR LITHIUM-ION A ELECTROLYTE LIQUIDE

La technologie Lithium-ion à électrolyte liquide (Li-ion) a été commercialisée en 1991 par Sony.

Composition électrochimique

- Electrode négative : matériau permettant l'insertion de lithium (principalement carboné), suivant le tableau ci-dessous [34] :

| Matériaux d'insertion anodiques | Capacité spécifique théorique |
|------------------------------------|-------------------------------|
| LiC_6 (graphite) | 372Ah.kg ⁻¹ |
| $\text{Li}_{0,5}\text{C}_6$ (coke) | 185Ah.kg ⁻¹ |
| LiWO_2 (tungstène) | 120Ah.kg ⁻¹ |
| LiMoO_2 (molybdène) | 199Ah.kg ⁻¹ |
| LiTiS_2 (titane) | 226Ah.kg ⁻¹ |
| Li-Al | 800Ah.kg ⁻¹ |

TABLEAU I-11 : MATERIAUX D'INSERTION ANODIQUES POUR ACCUMULATEUR LI-ION

La capacité spécifique du carbone lithié (insertion de Li) est de 372Ah.kg⁻¹, soit 10 fois moins que la capacité spécifique théorique du lithium à l'état métal, qui est de 3 862Ah.kg⁻¹ [34]. A titre de comparaison, la capacité spécifique du cadmium est de 477Ah.kg⁻¹.

- Electrode positive : comme pour l'électrode négative, l'électrode positive est un composé permettant l'insertion ou la désinsertion de l'ion Li^+ .

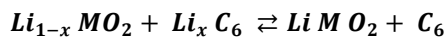
Les matériaux d'insertion cathodiques sont [34] :

- Matériaux dits « basse tension » : oxyde de vanadium (V_6O_{13} ou V_2O_5), bronze de vanadium (LiV_3O_8), disulfure de titane (TiS_2), disulfure de molybdène (MnO_2), polymères (polyacéthylène, polypyrolle, polyaniline, polythiophène)
- Matériaux dits « haute tension » : oxydes de métaux de transition lithiés LiCoO_2 , LiNiO_2 et LiMn_2O_4

| Matériaux d'insertion cathodiques « haute tension » | Capacité spécifique pratique |
|--|------------------------------|
| LiCoO ₂ | 180Ah.kg ⁻¹ |
| LiNiO ₂ | 220Ah.kg ⁻¹ |
| LiMn ₂ O ₄ | 140Ah.kg ⁻¹ |

TABLEAU I-12 : MATERIAUX D'INSERTION CATHODIQUES POUR ACCUMULATEUR LI-ION

- Electrolyte : l'électrolyte est liquide et aprotique (qui ne peut contenir ou fournir des protons) pour éviter de dégrader les électrodes très réactives, tel qu'une solution d'hexafluorophosphate de lithium (LiPF₆) dans un mélange de carbonate d'alkyles : carbonate d'éthylène (CE) et carbonate de propylène (CP) [34] ou tel que LiBOB (LiB(C₂O₄)₂) qui présente la particularité d'être moins acide que le LiPF₆, ce qui est préférable pour un accumulateur avec une électrode positive de type LiMn₂O₄ [35].
Remarque : l'électrolyte n'est pas aqueux car le lithium est très réactif avec l'eau.
- Réaction électrochimique : (M, métal, pouvant être Ni, Co ou Mn par exemple)



I-26

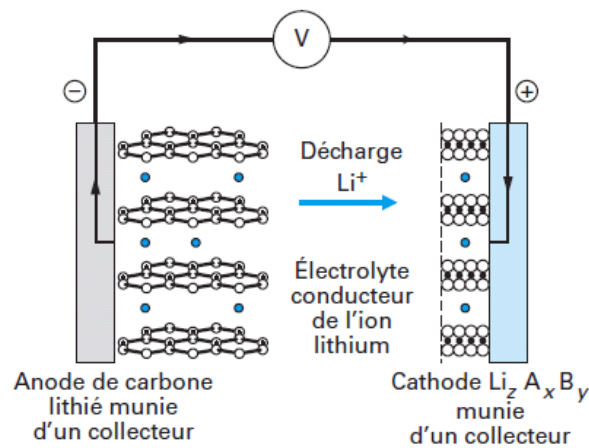


FIGURE I-13 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ACCUMULATEUR LI-ION [34]

Le principe de fonctionnement décrit pour un accumulateur Li-ion est le même que celui d'un accumulateur Li-métal, à la différence près que l'électrode négative est également un composé d'insertion, évitant ainsi le contact direct du Lithium à l'état métal avec l'électrolyte.

| | |
|-------------------------------|---|
| Tension à vide | >3,5V |
| Capacité spécifique théorique | 370Ah.kg ⁻¹ |
| Capacité spécifique pratique | 25 à 40Ah.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique massique | 90 – 180Wh.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique volumique | 200 – 300Wh.dm ⁻³ |
| Durée de vie | nombre de cycles = de 500 à 1000 |
| Températures d'utilisation | stockage : de -20°C à +50°C charge : de 0°C à +45°C décharge : de -20°C à +60°C |
| Rendement faradique global | entre 90 et 95% |
| Autodécharge | environ 0,3% par jour |

TABLEAU I-13 : CARACTERISTIQUES D'UN ELEMENT ACCUMULATEUR LI-ION [26], [29]

Quant à la durée de vie d'un accumulateur Li-ion, le nombre de cycles est variable, suivant les matériaux mis en jeu dans l'accumulateur. De plus la cyclabilité dépend des conditions dans lesquels ces cycles sont effectués (profondeur de décharge, température, courants de décharge et de charge, ...). Par exemple, pour des accumulateurs Li-ion de Saft, il est indiqué dans les datasheets que 70% de la capacité initiale est garantie après 500 décharges à 100% de profondeur de décharge. D'autres fabricants préconisent de ne pas décharger l'accumulateur en dessous d'une certaine tension seuil (*i.e.* profondeur de décharge) pour des raisons de cyclabilité.

Les accumulateurs Li-ion ne fonctionnent pas en fin de charge sur le principe de la recombinaison de l'oxygène (comme c'est le cas pour Ni-Cd ou Ni-MH) ou d'une autre espèce, mais sur celui de la limitation de l'état de charge par la tension [26]. La fin de charge est donc détectée par rapport à la tension maximale à ne pas dépasser pour des raisons de réversibilité et de stabilité.

Les avantages de l'accumulateur Lithium-ion sont :

- une densité énergétique massique 2 à 5 fois plus élevée que pour Ni-MH
- un faible encombrement
- une faible autodécharge
- pas d'effet mémoire

Ses inconvénients sont les suivants :

- sécurité : échauffements qui peuvent conduire à l'explosion, nécessite donc un système électronique de protection
- manque de maturité pour les versions de forte puissance, des travaux sont en cours pour faire évoluer les épaisseurs et les surfaces des électrodes pour permettre des densités d'énergie plus élevées
- coût (notamment pour les oxydes de métaux de transition lithiés à base de cobalt et de nickel)

Les fabricants d'accumulateurs Li-ion sont Saft (France), GAIA (Allemagne), Matsushita/Panasonic (Japon), GS YUASA (Japon), NEC Tokin (Japon), EnerDel (USA), Altairnano (USA) et A123systems (USA).

Leurs applications sont diverses : électronique portable (totalité du marché de la téléphonie portable), médicale, industrielle pour forte puissance (applications aéronautique, véhicules, systèmes de secours [36]), et aérospatiale (les satellites Galileo sont équipés d'accumulateurs Li-ion de forte puissance et d'une durée de vie de 12 ans).

Exemples d'accumulateurs Li-ion

On trouve par exemple plusieurs combinaisons anode/cathode dont les dénominations sont :

- LCO (Lithium Cobalt Oxyde) : LiC_6 / électrolyte / LiCoO_2
- NCA (Nickel, Cobalt, Aluminium) : LiC_6 / électrolyte / $\text{Li}(\text{Ni}_{0,85}\text{Co}_{0,1}\text{Al}_{0,05})$
- NCM (Nickel, Cobalt, Manganèse) : LiC_6 / électrolyte / $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{NiCo}$
- LMS (Lithium, Manganèse spinel) : LiC_6 / électrolyte / LiMnO_2 ou LiMn_2O_4
- MN (Manganèse, Titane) : LiC_6 / électrolyte / $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{Ni}$
- LTO (Lithium Titane) : LiTiO_2 / électrolyte / LiMnO_2

| | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Potentiel | 3,7V |
| Capacité spécifique théorique | 180Ah.kg^{-1} |
| Densité énergétique massique | 500Wh.kg^{-1} (pratique) |

TABLEAU I-14 : CARACTERISTIQUES DE L'ELECTRODE POSITIVE D'UN ACCUMULATEUR LITHIUM-ION « LCO » [26]

| | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Potentiel | 3,8V |
| Capacité spécifique théorique | 140Ah.kg^{-1} |
| Densité énergétique massique | 450Wh.kg^{-1} (pratique) |

TABLEAU I-15 : CARACTERISTIQUES DE L'ELECTRODE POSITIVE D'UN ACCUMULATEUR LITHIUM-ION « LMS » [26]

Les performances des combinaisons sus-citées sont assez similaires car elles sont composées de matériaux d'insertion cathodiques « haute tension », dont le potentiel par rapport au lithium est compris entre 3,5V et 3,8V. Associé à une électrode négative en graphite, le matériau d'électrode positif LiCoO₂ est le plus utilisé, toutes utilisations confondues. L'oxyde de nickel lithié LiNiO₂ est plus performant (en énergie et en cyclabilité) mais est plus toxique et beaucoup plus cher que le matériau LiMn₂O₄.

Accumulateur Lithium-Phosphate : cas particulier d'accumulateur Li-ion

L'accumulateur Lithium Phosphate est un accumulateur de la famille des accumulateurs Lithium-ion, dans lequel la cathode est à base de phosphate de métaux de transition lithiés. Ce type de cathode a été découvert par J. B. Goodenough en 1994.

Composition électrochimique

- Electrode négative : LiC₆ (cf. Li-ion)
- Electrode positive : Phosphate de métal (fer : LiFePO₄ ou LiMnPO₄ ou LiFeMgPO₄)
- Electrolyte : idem Li-ion

| | |
|-------------------------------|---|
| Tension à vide | ≈ 3,3V |
| Capacité spécifique pratique | 35Ah.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique massique | 110Wh.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique volumique | 250Wh.dm ⁻³ |
| Durée de vie | nombre de cycles > 2000 cycles à DOD 100% |
| Températures d'utilisation | stockage : de -40°C à +50°C charge : de 0°C à +45°C décharge : de -10°C à +50°C |
| Autodécharge | 0,15% par jour |

TABLEAU I-16 : CARACTERISTIQUES D'UN ELEMENT ACCUMULATEUR LITHIUM-PHOSPHATE [37]

Les avantages d'un accumulateur Lithium-Phosphate sont :

- le coût : moins cher que Li-ion ou Li-ion polymère car les matériaux utilisés (notamment le phosphate de fer est moins coûteux que le nickel ou le cobalt) mais encore proche de 1000€/kWh en raison de la mise en œuvre de nanotechnologies)
- la sécurité : pas de dégagement d'oxygène à la cathode, donc diminution du risque de feu ou d'explosion de l'accumulateur
- la cyclabilité : la vitesse de charge et décharge est un des principaux avantages d'un accumulateur LiFePO₄, de par sa nanostructure (quelques dizaines de secondes au lieu de plusieurs minutes). De plus, sa capacité initiale ne diminue pas avec le nombre de cycles (même à profondeur de décharge élevée)

Son principal inconvénient est la dissolution du fer (favorisée par la température) qui peut nuire à sa cyclabilité. Les fabricants d'accumulateurs Lithium-Phosphate sont Valence (USA) pour LiFeMgPO₄, GAIA (Allemagne) pour LFP et A123systems (USA).

Les applications de ces accumulateurs sont dans les domaines du transport, militaire, industriel et stationnaire.

3.1.3.3.3 ACCUMULATEUR LITHIUM-METAL POLYMERE

L'accumulateur Lithium-métal Polymère (LMP) est une alternative aux accumulateurs Li-ion pour lesquels l'électrolyte, liquide, pose des problèmes en termes de sûreté de fonctionnement.

Composition électrochimique

- Electrode négative : Li (sous forme de films fins métalliques) [34]

- Electrode positive : composé d'insertion réversible (tel que l'oxyde de vanadium V_6O_{13} , ou LiV_3O_8 ou TiS_2) [34]
- Electrolyte : membrane polymère POE-LiX (poly-oxyde d'éthylène chargé en ions lithium) associée à un solvant aprotique liquide [34]
 - L'électrolyte est dit « gélifié » si la membrane POE-LiX est soluble dans le solvant (tel que carbonate d'éthylène ou le carbonate de polypropylène)
 - L'électrolyte est dit « plastifié » si la membrane n'est pas soluble, mais rendue poreuse pour pouvoir absorber le solvant. Par exemple, une membrane constituée d'homopolymère PVDF (polyfluorure de vinylidène) ou de copolymère PVDF-HFP (hexafluoropropylène) peut absorber une solution de $LiClO_4$.

L'électrolyte devrait être maintenu à la température de 80-100°C pour un fonctionnement optimal de l'accumulateur.

| | |
|--------------------------------------|--|
| <i>Tension à vide</i> | > 3,5V |
| <i>Capacité spécifique pratique</i> | 35Ah.kg ⁻¹ |
| <i>Densité énergétique massique</i> | 120-140Wh.kg ⁻¹ |
| <i>Densité énergétique volumique</i> | 200-300Wh.dm ⁻³ |
| <i>Durée de vie</i> | nombre de cycles = 1200 à DOD 80% |
| <i>Températures d'utilisation</i> | > charge : de 0°C à +40°C > décharge : de -20°C à +60°C |
| <i>Rendement faradique global</i> | proche de 100% (car électrolyte non aqueux) |

TABLEAU I-17 : CARACTERISTIQUES D'UN ELEMENT ACCUMULATEUR LITHIUM-METAL POLYMERE [38]

Les avantages de l'accumulateur LMP sont les suivants :

- facilement modulable, un accumulateur LMP peut prendre la forme appropriée pour l'application
- masse : léger
- performances spécifiques élevées
- pas d'effet mémoire
- autodécharge : 10% par mois
- durée de vie : de l'ordre de 10 ans
- sécurité : l'électrolyte polymère permet de s'affranchir des problèmes de sécurité que l'on peut constater pour les accumulateurs au lithium à électrolyte liquide

Ses inconvénients sont :

- un risque de dendrites associé à l'électrode de lithium

Les fabricants d'accumulateurs Li-métal polymère sont Batscap/Bolloré (France) et Avestor (Canada).

Leurs applications sont diverses : modélisme, vélo électrique, transport, médical, militaire et stationnaire.

3.1.3.3.4 ACCUMULATEUR LITHIUM-ION POLYMERE

L'accumulateur Lithium-ion Polymère (LiPo) est un accumulateur composé de deux électrodes à insertion de lithium et d'un électrolyte polymère.

Composition électrochimique

- Electrode négative : idem Li-ion
- Electrode positive : idem Li-ion
- Electrolyte : électrolyte « plastifié », constitué d'une matrice poreuse telle que le copolymère PVDF-HFP (polyfluorure de vinylidène et hexafluoropropylène) [34]

| | |
|-------------------------------|--|
| Tension à vide | > 3,5V |
| Densité énergétique massique | 130Wh.kg ⁻¹ |
| Densité énergétique volumique | 300Wh.dm ⁻³ |
| Durée de vie | nombre de cycles = 1500 cycles |
| Températures d'utilisation | > charge : de 0°C à +40°C > décharge : de -20°C à +60°C |
| Rendement faradique global | proche de 100% (car électrolyte non aqueux) |

TABLEAU I-18 : CARACTERISTIQUES D'UN ELEMENT ACCUMULATEUR LITHIUM-ION POLYMERE

Les avantages de l'accumulateur Lithium-ion polymère sont :

- une faible masse
- un nombre de cycles élevé
- pas d'effet mémoire
- une faible autodécharge

Les fabricants sont Kokam (Corée) pour l'électronique et le transport.

Ces accumulateurs sont utilisés pour des applications en stationnaire et pour le transport.

3.1.4 ELEMENTS DE COMPARAISON ENTRE ACCUMULATEURS ELECTROCHIMIQUES

Les performances en termes de capacité spécifique et d'énergie spécifique sont dues entre autres à la tension à vide des accumulateurs (Tableau I-19). Par exemple, les accumulateurs au lithium bénéficient d'une tension à vide élevée (près de trois fois celle d'un accumulateur Ni-Cd) due au potentiel relatif standard élevé du couple redox Li⁺/Li (-3,01V). En comparaison, le potentiel relatif standard du couple redox Cd²⁺/Cd est de -0,40V.

| ACCUMULATEURS | Unité | Pb-acide | Ni-Cd | Ni-MH | Ni-Zn | Li-ion | LMP | LiPo |
|--------------------|------------------------|----------|-------|-------|-------|--------|-----|---------|
| Tension à vide | [V] | 2 | 1,3 | 1,3 | 1,7 | 3,7 | 3,7 | 3,7 |
| Energie spécifique | [Wh.kg ⁻¹] | 15-40 | 30-60 | 60-90 | 60-70 | 90-180 | 110 | 120-140 |

TABLEAU I-19 : SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES TENSION A VIDE ET ENERGIE SPECIFIQUE DES ACCUMULATEURS

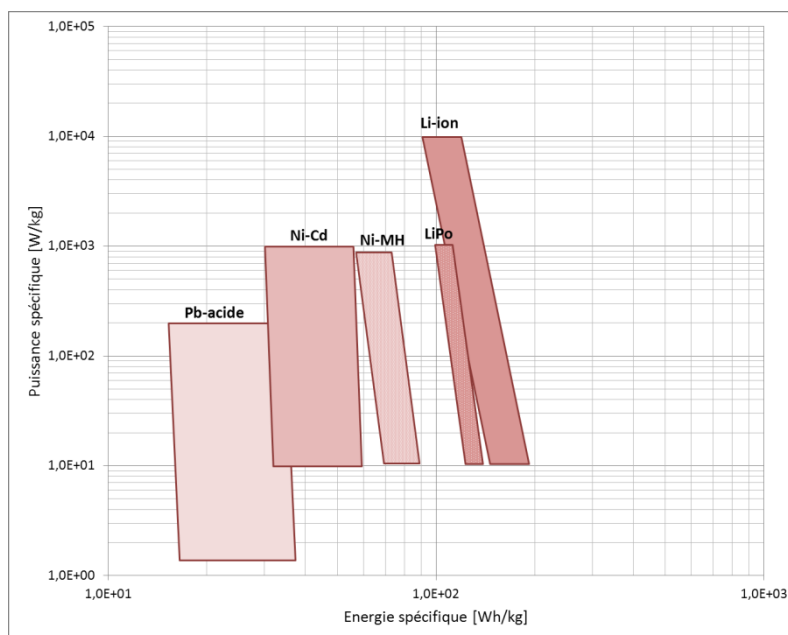


FIGURE I-14 : DIAGRAMME DE RAGONE - ACCUMULATEURS

Les caractéristiques Energie/Puissance des accumulateurs sont présentées dans un diagramme de Ragone (Figure I-14) et les caractéristiques listées dans le Tableau I-1, sont présentées dans les diagrammes Toile d'araignée (Figure I-15).

D'après les résultats synthétisés dans le tableau et sur le diagramme de Ragone, les accumulateurs au lithium sont les plus performants en termes d'énergie spécifique (supérieure à 100Wh.kg^{-1}) et de densité de puissance. Ils présentent également des caractéristiques satisfaisantes, et meilleures que celles des autres technologies, compte-tenu des critères retenus pour évaluer les accumulateurs, à savoir le temps de décharge, le nombre de cycles, le rendement et l'autodécharge (Cf. Figure I-15).

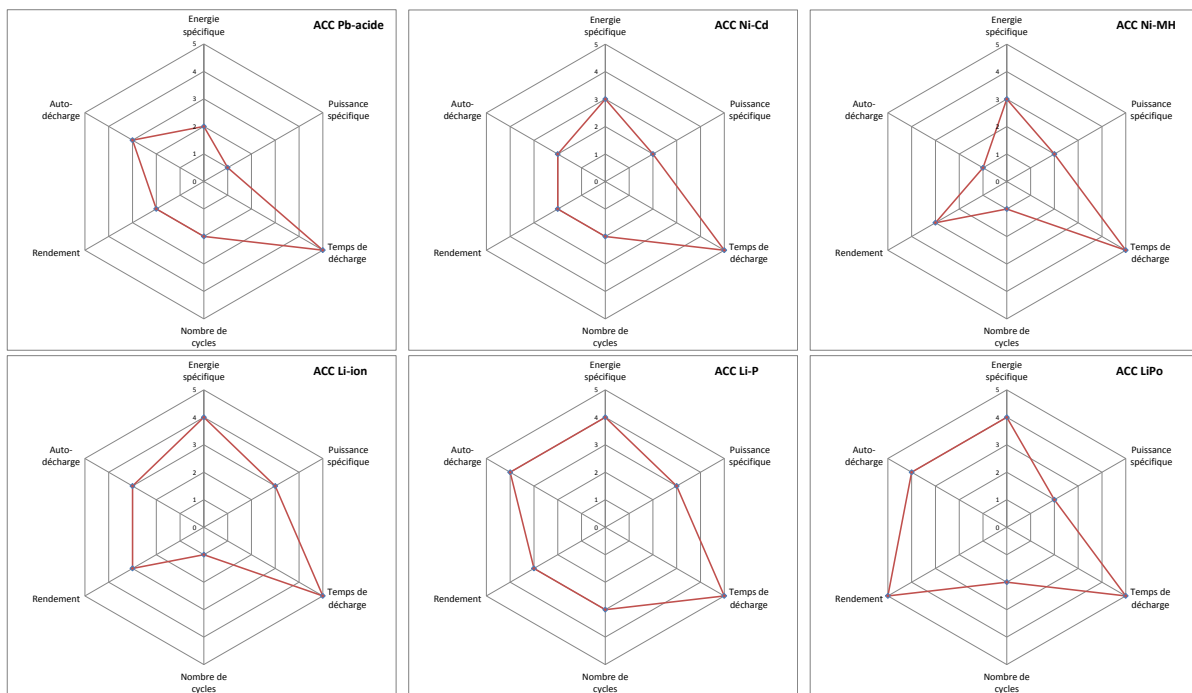


FIGURE I-15 : DIAGRAMMES « TOILE D'ARAIGNEE » - ACCUMULATEURS

3.2 STOCKAGE PAR LA FILIERE HYDROGENE

Le stockage par la filière hydrogène est un moyen indirect de stocker de l'énergie, au même titre que les moyens de stockage électrochimique ou électromécanique, car il nécessite une conversion de l'énergie. Cependant, la réversibilité pour passer de l'énergie électrique au dihydrogène n'est pas immédiate et les moyens de conversion à mettre en œuvre sont complexes.

Le stockage par la filière hydrogène nécessite une transformation de l'énergie électrique en dihydrogène H_2 puis une deuxième transformation du dihydrogène en électricité.

Ce système de stockage comprend donc trois composants clés que sont [1]:

- l'électrolyseur (permet la transformation de l'énergie électrique en dihydrogène)
- le moyen de stockage de l'hydrogène
- la pile à combustible (permet la génération d'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air)

3.2.1 ELECTROLYSEUR

L'électrolyseur permet de transformer l'électricité provenant du réseau électrique en dihydrogène par l'électrolyse de l'eau.

On distingue deux catégories d'électrolyseur [39] :

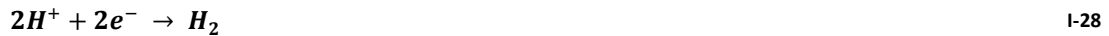
- « solide », autrement dit polymère utilisant une membrane échangeuse de proton (PEM : Proton Exchange Membrane) et une céramique haute température (SO : Solid Oxide)
- « liquide », électrolyte acide ou basique du type hydroxyde de potassium (KOH)

Réaction électrochimique en milieu acide [40] :

* à l'anode :



* à la cathode :



* bilan :



3.2.2 LE STOCKAGE DE L'HYDROGENE

L'hydrogène peut être stocké puis distribué sous plusieurs formes [39] :

- sous forme gazeuse, comprimée sous haute pression
- sous forme solide : hydrure de métaux
- sous forme liquide

Le stockage sous pression - La première étape consiste à comprimer le gaz, souvent à travers un système multi-étage. Le stockage sous forme gazeuse nécessite alors des réservoirs capables de résister à une forte pression (entre 350 et 700 bars) et à l'élévation de température due à la compression rapide du gaz. Des systèmes de refroidissement sont généralement employés. On estime que la compression du gaz consomme environ 10% de l'énergie primaire.

Le stockage sous forme liquide - L'hydrogène est sous sa forme liquide lorsque sa température est de -253°C (20K). Le stockage sous forme liquide nécessite donc un équipement cryogénique, donc de l'énergie pour maintenir l'hydrogène à cette température (de l'ordre de 30% de l'énergie stockée). Pour ce moyen de stockage, les aspects de sécurité doivent être pris en compte, ainsi que les pertes lors du stockage (autodécharge).

Le stockage sous forme solide - C'est une forme de stockage d'hydrogène qui permet à celui-ci de s'insérer dans le réseau cristallin d'un métal avec lequel l'hydrogène a la propriété de former des liaisons covalentes ou ioniques. Ce type de métaux ou alliages peuvent donc stocker l'hydrogène entre leurs atomes. Le procédé d'adsorption est exothermique et celui de désorption est endothermique et nécessite un apport de chaleur, dont va dépendre la vitesse de décharge.

Les moyens de stockage de l'hydrogène présentent les propriétés suivantes [7] :

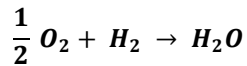
- Densité énergétique massique :
 - o 2000Wh.kg⁻¹ pour l'hydrogène (gazeux, liquide ou solide)
 - o 12kWh.kg⁻¹ pour un hydrocarbure
- Densité énergétique volumique :
 - o entre 700 et 1000Wh.L⁻¹ pour l'hydrogène gazeux
 - o 1400Wh.L⁻¹ pour l'hydrogène liquide
 - o entre 1000 et 2000Wh.L⁻¹ pour les hydrures de métaux
 - o 9kWh.L⁻¹ pour un hydrocarbure

Le stockage de l'hydrogène et sa distribution est une problématique identique à la distribution de tout autre gaz, avec des contraintes supplémentaires, telles que la haute diffusivité, la très faible densité (sous forme gazeuse ou liquide), et l'inflammabilité. Des mesures en termes de sécurité doivent être prises, ce qui représente un coût.

3.2.3 PILE A COMBUSTIBLE

La pile à combustible (PAC), ou Fuel Cell (FC) en anglais, permet la génération d'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air.

Réaction électrochimique :



I-30

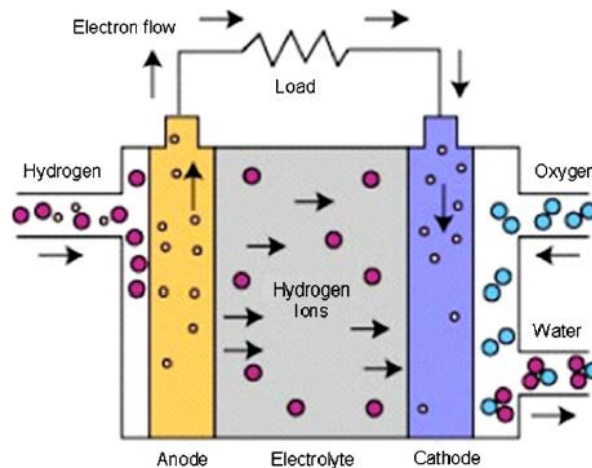


FIGURE I-16 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE PILE A COMBUSTIBLE (PAC)

On distingue plusieurs types de PAC [1] :

- PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)
- AFC (Alkaline Fuel Cell) : pile alcaline
- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) : pile à carbonate fondu
- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) : pile à acide phosphorique

Les différences notables entre ces différentes piles sont l'électrolyte utilisé, la température de fonctionnement, le dimensionnement et l'application.

3.2.4 ACCUMULATEUR A COMBUSTIBLE

Si on considère l'ensemble du système {Electrolyseur + stockage + PAC} comme un accumulateur à combustible réversible, les énergies spécifiques données précédemment pour le stockage de l'hydrogène sont à rapporter à l'ensemble de la chaîne énergétique.

De plus, le rendement de la chaîne énergétique n'est pas très bon si on prend en considération le rendement d'un électrolyseur et celui d'une pile à combustible, soit de l'ordre de 30 à 40% pour la chaîne complète.

Aussi, les coûts d'investissement sont élevés et la durée de vie est limitée, particulièrement pour les applications de forte puissance [1].

La Figure I-17 présente le diagramme de Ragone et le diagramme « toile d'araignée » pour un système de stockage par hydrogène.

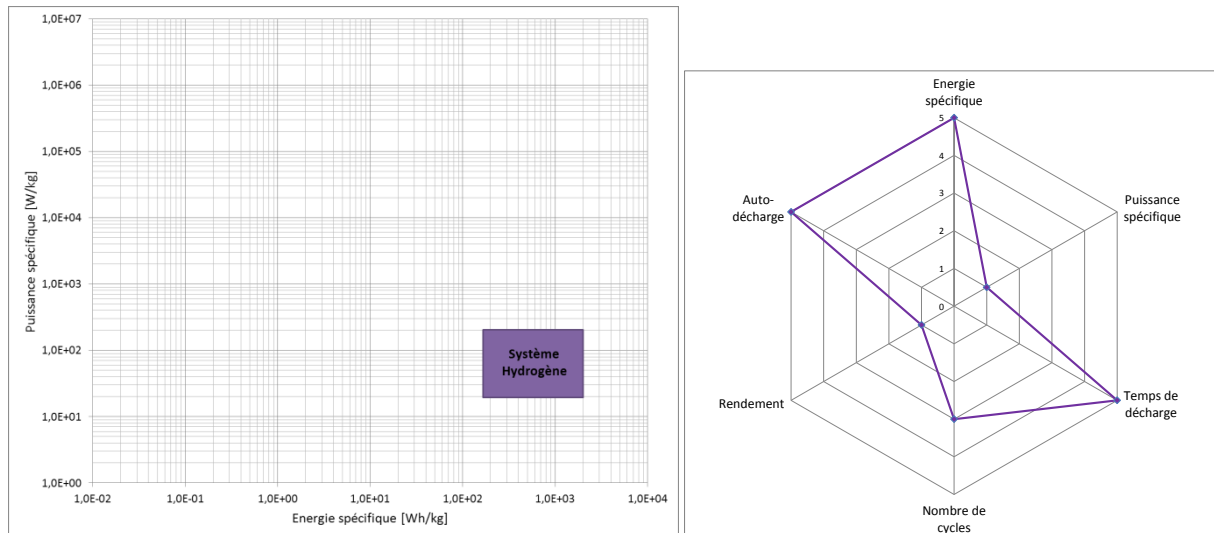


FIGURE I-17 : DIAGRAMMES DE RAGONE ET TOILE D'ARAIGNEE – SYSTEME DE STOCKAGE PAR HYDROGENE

4 COMPARAISON DES MOYENS DE STOCKAGE

Une synthèse des densités énergétiques massiques de différents moyens de stockage est proposée dans le Tableau I-20.

| <i>centralisé</i> | <i>décentralisé</i> | <i>non réversible</i> | <i>réversible</i> | <i>indirect</i> | <i>direct</i> | <i>Moyen de stockage</i> | <i>Energie spécifique [Wh.kg⁻¹]</i> |
|-------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|---------------|----------------------------|--|
| | | | | | | Condensateurs | < 0,1 |
| | | | | | | Supercondensateurs | 0,2 – 10 |
| | | | | | | SMES | 2 – 4 |
| | | | | | | Volant d'inertie (système) | 5 – 50 |
| | | | | | | ACC Pb | 15 – 40 |
| | | | | | | ACC Ni-Cd | 30 – 60 |
| | | | | | | ACC Ni-Zn | 60 – 70 |
| | | | | | | ACC Ni-MH | 60 – 90 |
| | | | | | | ACC Li-métal | 50 |
| | | | | | | ACC Li-ion | 90 – 150 |
| | | | | | | ACC LMP | 110 |
| | | | | | | ACC LiPo | 120 – 140 |
| | | | | | | H ₂ (seul) | 2000 |
| | | | | | | Bois | 4000 |
| | | | | | | Charbon | 8000 |
| | | | | | | Pétrole | 10 – 12.10 ³ |
| | | | | | | Gaz naturel | 10 – 14.10 ³ |
| | | | | | | Uranium enrichi | 600.10 ⁶ |
| | | | | | | Eau (chute d'eau de 1000m) | 3 |

TABLEAU I-20 : COMPARAISON DE L'ENERGIE SPECIFIQUE DE DIFFERENTS MOYENS DE STOCKAGE

Rappel : concernant les dispositifs de stockage indirect, il est nécessaire de prendre en considération les moyens de conversion de l'énergie électrique en autre énergie (chimique, mécanique, dihydrogène).

Les moyens de stockage présentés dans les paragraphes I.2 et I.3, sont décentralisés (embarqués), réversibles (susceptibles de fournir et de recevoir de l'énergie) et directs ou indirects selon sous quelle forme l'énergie est stockée. Le Tableau I-20 permet de les mettre en perspective, par rapport à d'autres moyens de stockage, pouvant être centralisés ou non réversibles, notamment les carburants que l'on retrouve dans les VEH.

De plus, un diagramme de Ragone est donné en Figure I-18 pour les différents moyens de stockage listés dans les deux précédents paragraphes.

Le moyen de stockage idéal disposerait à la fois d'une puissance spécifique élevée et d'une grande densité d'énergie. Or il apparaît sur le diagramme de Ragone qu'aucun des moyens de stockage ne présente ces propriétés. C'est la raison pour laquelle on s'oriente vers une association de moyens de stockage dont les caractéristiques Energie/Puissance sont complémentaires.

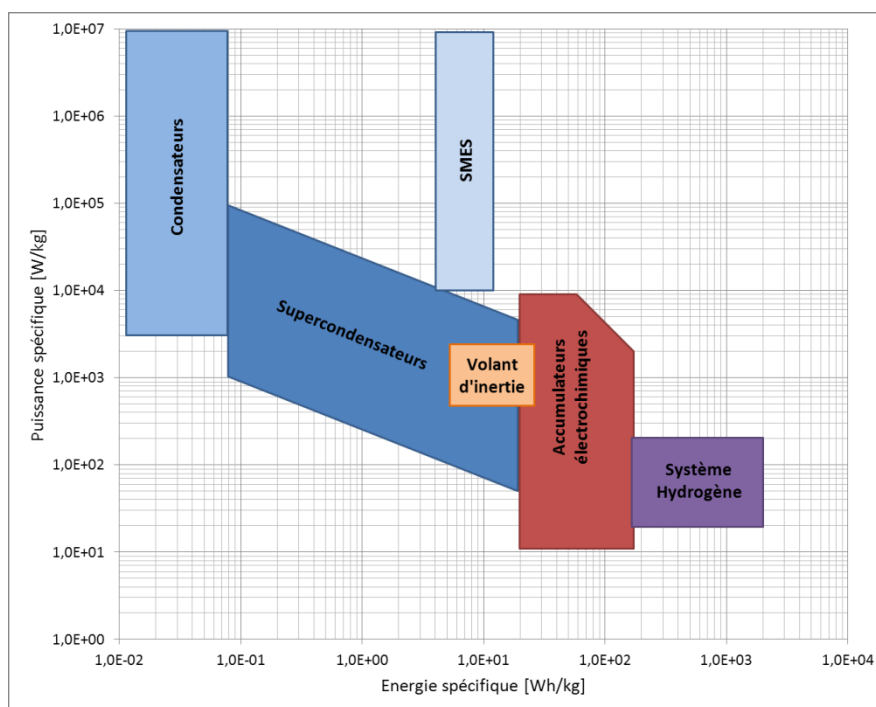


FIGURE I-18 : DIAGRAMME DE RAGONE – MOYENS DE STOCKAGE

Parmi les Systèmes de Stockage de l'Énergie (SSE) à puissance spécifique élevée, les supercondensateurs sont un bon compromis Energie/Puissance. Les condensateurs sont trop peu énergétiques et quant aux SMES, dont les performances sont intéressantes (plus puissants que les supercondensateurs à densité d'énergie équivalente), leur mise en œuvre reste encore difficile, surtout dans l'optique d'une application embarquée. Les volants d'inertie présentent des caractéristiques assez semblables à celles des supercondensateurs. Bien qu'ils soient déjà utilisés pour certains moyens de transport, leur mise en œuvre demeure délicate et la sûreté de fonctionnement du système volant d'inertie reste une forte préoccupation.

Concernant les SSE à énergie spécifique élevée, les accumulateurs électrochimiques de technologies au lithium sont certainement le moyen le plus adapté pour une application embarquée, en comparaison avec un système à hydrogène pour lequel les technologies sont assez peu matures.

Dans un premier temps, les moyens de stockage décentralisés et réversibles, pouvant être employés dans une application transport, ont été présentés. Puis, ces moyens ont été comparés afin d'identifier ceux qui présentent les caractéristiques susceptibles de convenir pour cette application. De cette comparaison, se dégage une orientation vers l'hybridation de supercondensateurs (sources de puissance) et d'accumulateurs électrochimiques au lithium (source d'énergie).

L'étape suivante consiste à passer en revue les moyens de stocker l'énergie actuellement utilisés dans les aéronefs. Les objectifs sont de situer ces moyens de stockage par rapport à ceux qui ont été précédemment listés et de comprendre comment ils sont intégrés dans les réseaux de bord et quelle est leur fonction dans la fourniture d'énergie électrique à l'aéronef.

5 LES MOYENS DE STOCKAGE DE L'ENERGIE DANS LES AERONEFS

Ce paragraphe présente un état de l'art des moyens de stockage utilisés dans les aéronefs. Dans un aéronef (avion ou hélicoptère), les divers systèmes énergétiques sont alimentés par des sources de nature différente : hydraulique, électrique et pneumatique.

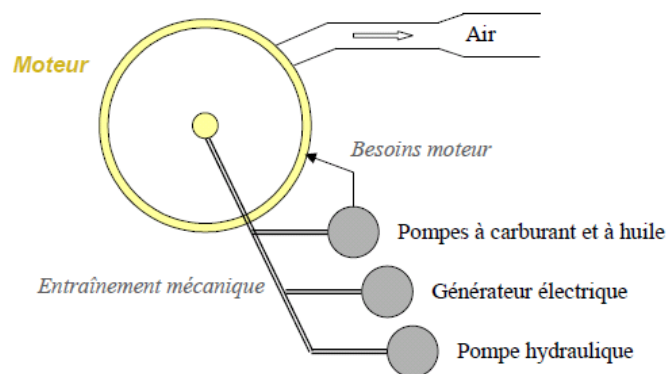


FIGURE I-19 : DIFFERENTES NATURES D'ENERGIE DANS UN AERONEF CONVENTIONNEL [41]

Dans un avion conventionnel, l'énergie électrique permet le fonctionnement de nombreux auxiliaires tels que divers calculateurs, instruments de navigation, commandes d'actionneurs, éclairages, et autres charges liées au confort des passagers. Depuis quelques années, on s'oriente vers un avion « plus électrique », c'est-à-dire un avion où une partie de l'énergie hydraulique est remplacée par l'énergie électrique, notamment pour des systèmes de puissance (exemple : servocommandes). Cette évolution est rendue possible grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance en termes de performances et de fiabilité. Les avantages de l'énergie électrique par rapport à l'hydraulique sont une mise en œuvre plus aisée et une réduction notable de la masse embarquée. Cette orientation « plus électrique », décrite précédemment pour les avions, s'applique également aux hélicoptères, dans une moindre mesure car la puissance disponible installée dans un hélicoptère est inférieure à celle des avions civils.

Pour appréhender les éléments de stockage dans les aéronefs, il est nécessaire de préciser au préalable leur environnement, autrement dit l'architecture électrique de l'aéronef. Dans les paragraphes suivants, on décrit comment l'énergie électrique est générée, puis distribuée et convertie, et enfin stockée pour trois types d'aéronefs : les avions dits « conventionnels », les avions « plus électriques » et les hélicoptères.

5.1 LES AVIONS CONVENTIONNELS

5.1.1 L'ENERGIE ELECTRIQUE DANS LES AVIONS CONVENTIONNELS

Un avion conventionnel (du type Airbus A330 ou A340) est composé d'un réseau primaire en alternatif 115V-200V AC – 400Hz et d'un sous réseau en continu 28V DC. La puissance disponible installée est de l'ordre de 300kVA [41]. La Figure I-20 présente l'architecture « 3H » d'un Airbus A330, qui comporte trois circuits hydrauliques : deux d'entre eux sont reliés aux deux réacteurs et le troisième est relié à la RAT⁴ (Ram Air Turbine). La génération électrique, pour le réseau alternatif 115V AC, est assurée par des générateurs couplés sur les réacteurs. Un biréacteur dispose de deux réseaux alternatifs qui sont ségrégués en fonctionnement normal, et reliés en cas de défaillance d'un réacteur ou de son générateur associé. Le bus continu 28V DC est obtenu par des systèmes redresseurs à partir du réseau alternatif. Des sources auxiliaires sont embarquées, telles que l'APU (Auxiliary Power Unit), le générateur de secours entrainé par la RAT, et des batteries d'accumulateurs. L'APU et le générateur de secours sont connectés sur le réseau alternatif, au même titre que la source extérieure du type « prise de parc » lorsque l'appareil est au sol.

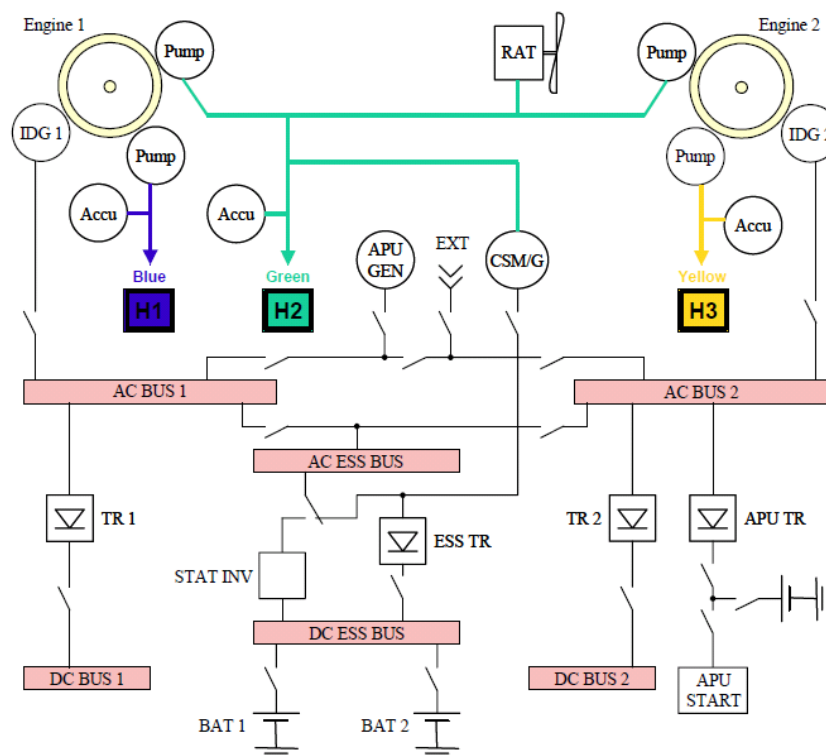


FIGURE I-20 : ARCHITECTURE D'UN BIREACTEUR « 3H » A RESEAUX ELECTRIQUES AC ET DC (A330) [41]

Ci-dessous sont donnés quelques éléments de nomenclature pour la compréhension de la Figure I-20 :

IDG (Integrated Drive Generator) : générateur couplé au réacteur

APU (Auxiliary Power Unit) : groupe générateur auxiliaire

CSM/G (Constant Speed Motor / Generator) : générateur de secours entrainé par la RAT

EXT : prise de parc lorsque l'avion est au sol

TR (Transformer Rectifier) : systèmes redresseurs pour générer du 28V DC à partir du 115V AC

ESS (Energy Storage System) : Système de Stockage de l'Energie, ici il s'agit des batteries BAT1 et BAT2.

⁴ La RAT est une éolienne qui est déployée en cas de secours. Dans un avion conventionnel, elle permet de pressuriser un des trois circuits hydrauliques en cas de besoin [42].

5.1.2 LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AVIONS CONVENTIONNELS

Dans un avion conventionnel, l'énergie électrique est stockée sous la forme électrochimique, par des batteries d'accumulateurs, connectées au réseau en cas de besoin [42]. Les batteries ont pour fonction la mise sous tension de l'avion au sol, typiquement le démarrage de l'APU. Ce dernier étant connecté au réseau alternatif, son alimentation nécessite une conversion par les onduleurs connectés entre les réseaux DC et AC. En fonctionnement normal, en vol, les batteries ne sont connectées au bus continu que pour être rechargées. Les batteries ont également en charge d'assurer la continuité électrique en cas de défaillance ou de panne jusqu'à l'atterrissage. Par exemple, elles alimentent en cas de défaillance les charges essentielles du bus continu, telles que les calculateurs. Elles sont donc dimensionnées pour maintenir un niveau de tension pendant plusieurs minutes.

La technologie d'accumulateurs électrochimiques la plus courante dans les avions conventionnels est la technologie Ni-Cd (Nickel-Cadmium) [42]. Les batteries Ni-Cd ULM® (Ultra Low Maintenance) de la société Saft [43] équipent notamment les applications suivantes : Airbus A330/A340 et Boeing 737/747/767.

5.2 LES AVIONS « PLUS ÉLECTRIQUES »

5.2.1 L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AVIONS « PLUS ÉLECTRIQUES »

Un avion « plus électrique » (du type Airbus A380) est composé d'un réseau primaire alternatif 115V-200V AC à fréquence variable entre 360 et 800Hz. La puissance disponible installée est de l'ordre de 600kVA. La Figure I-21 présente l'architecture « 2H + 2E » d'un Airbus A380, qui comporte deux circuits hydrauliques et deux réseaux électriques indépendants. Dans cette configuration, la RAT est électrique. En cas de secours, elle fournit directement une puissance électrique au réseau, ce qui explique la suppression du générateur de secours.

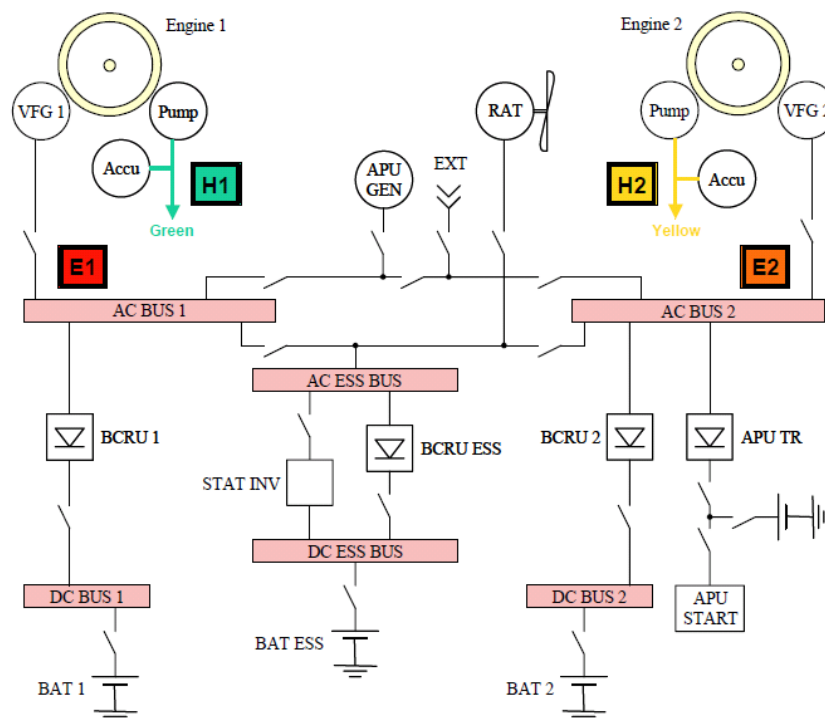


FIGURE I-21 : ARCHITECTURE D'UN BIREACTEUR « 2H+2E » A RESEAUX ELECTRIQUES AC ET DC (A380) [41]

Ci-dessous sont donnés quelques éléments de nomenclature pour la compréhension de la Figure I-21 :

VFG (Variable Frequency Generator) : générateur à fréquence variable couplé à un réacteur

APU (Auxiliary Power Unit) : groupe générateur auxiliaire

BCRU (Battery Charger Rectifier Unit) : système redresseur permettant la génération de 28V DC à partir du 115V AC

EXT : prise de parc lorsque l'avion est au sol

ESS (Energy Storage System) : Système de Stockage de l'Energie, ici il s'agit de BAT1, BAT2 et BAT ESS.

La génération électrique du réseau alternatif est réalisée par des générateurs à fréquence variable couplés sur les réacteurs. Chaque générateur alimente son réseau alternatif, sur lequel viennent se connecter des charges capables de supporter, grâce à l'électronique de puissance, les variations de fréquences indiquées. Le bus continu 28V DC est relié au réseau alternatif par des systèmes redresseurs. Ces dispositifs permettent d'alimenter le bus continu et de gérer la charge des batteries, et garantissent ainsi la fonction NBPT (No Break Power Transfer) de l'A380.

L'avion « bleedless⁵ » (du type Boeing B787 Dreamliner) est un avion dans lequel l'énergie pneumatique a été remplacée par l'énergie électrique. La puissance électrique installée est donc augmentée en conséquence, elle est de l'ordre de 1MVA (voire de 1,45MVA si l'on tient compte des générateurs entraînés par l'APU). L'avion « bleedless » est composé d'un réseau alternatif 230V-400V AC à fréquence variable à partir duquel on génère un bus continu haute tension $\pm 270V$ DC et des réseaux AC et DC plus classiques 115V-200V AC et 28V DC.

5.2.2 LE STOCKAGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE DANS LES AVIONS « PLUS ELECTRIQUES »

Dans ce type d'avion, l'énergie électrique est stockée essentiellement par des batteries d'accumulateurs. Celles-ci sont connectées aux barres DC en permanence pour éviter les coupures de courant sur ces bus. Les batteries ont pour fonction l'alimentation électrique autonome pour le démarrage des moteurs ou des groupes auxiliaires de puissance au sol ou en vol et l'alimentation électrique d'urgence en cas de défaillance ou panne du système de génération électrique en vol.

En ce qui concerne la technologie d'accumulateurs électrochimiques, la technologie Ni-Cd implantée en masse dans les avions conventionnels est également présente dans l'avion « plus électrique », mais la technologie à base de lithium émerge. Ainsi, la société Saft [43] fournit des batteries Ni-Cd ULM[®] pour l'avion Airbus A380 et fournit également des batteries Li-ion pour le futur long-courrier A350 XWB de Airbus.

Une part marginale du stockage électrique est assurée par des supercondensateurs. C'est le cas dans l'avion « plus électrique » Airbus A380 qui est équipé de supercondensateurs, fournis par la société Maxwell, pour l'alimentation du système d'ouverture d'urgence des portes.

5.3 LES HELICOPTERES

5.3.1 L'ENERGIE ELECTRIQUE DANS LES HELICOPTERES

Un hélicoptère, du type 9-11t⁶, est composé d'un réseau primaire en alternatif 115V-200V AC – 400Hz et un sous réseau en continu 28V DC. La puissance disponible installée est de l'ordre d'une centaine de kilo-Volt-Ampère.

⁵ Le terme « bleed » définit le prélèvement d'air au niveau des étages de compression des réacteurs, générant une énergie pneumatique nécessaire pour le système de conditionnement d'air et pour les fonctions de dégivrage. Un avion « bleedless » ne comporte plus de système de prélèvement d'air au niveau des moteurs et le réseau pneumatique principal est supprimé. Les systèmes pneumatiques de l'avion conventionnel sont électrifiés dans l'avion « bleedless », d'où l'augmentation notable de la puissance électrique installée.

⁶ Un hélicoptère 9-11t est un hélicoptère de transport, dont la masse maximale est de 11 tonnes.

La Figure I-22 présente l'architecture d'un hélicoptère. La génération électrique, pour le réseau alternatif 115V AC, est assurée par des alternateurs couplés sur les turbines. Le bus continu 28V DC est obtenu par des systèmes redresseurs à partir du réseau alternatif. Des sources auxiliaires sont embarquées, telles que l'APU connecté sur le réseau alternatif ou encore le générateur de secours qui alimente le bus 28V DC en cas d'urgence. Lorsque l'hélicoptère est au sol, des groupes de parc peuvent être aussi connectés : l'ACEPU pour le réseau 115V AC et le DCEPU pour le bus 28V DC. Enfin des batteries d'accumulateurs sont connectées au bus continu.

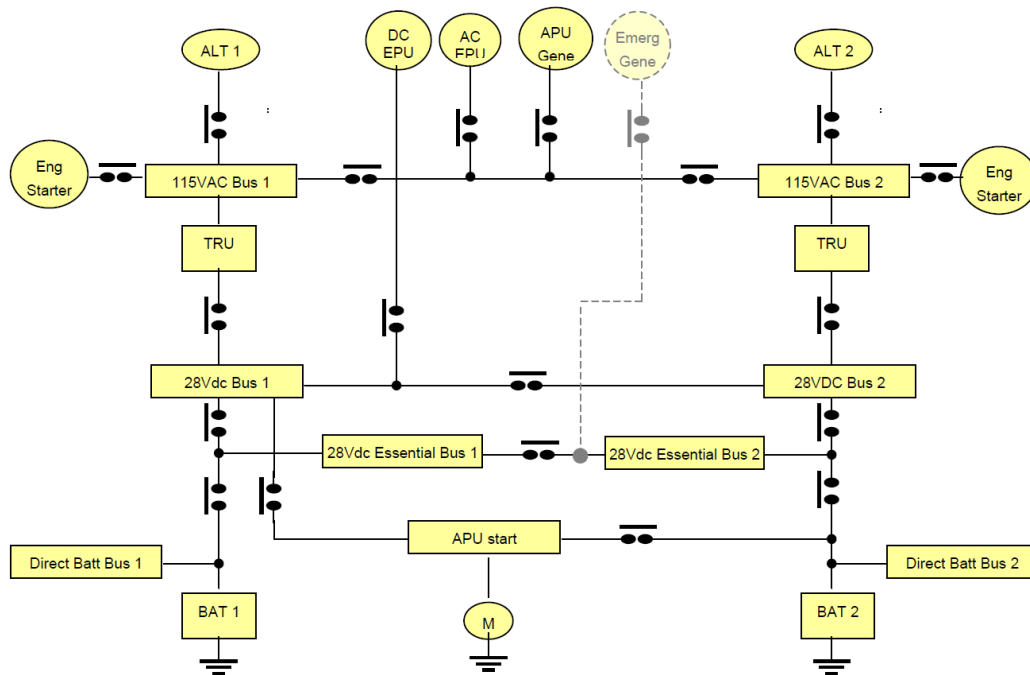


FIGURE I-22 : ARCHITECTURE D'UN HELICOPTERE BIMOTEUR [44]

Ci-dessous sont donnés quelques éléments de nomenclature pour la compréhension de la Figure I-22 :

- TRU (Transformer Rectifier Unit) : système redresseur pour obtenir du 28V DC à partir du 115V AC
- APU (Auxiliary Power Unit) : groupe générateur auxiliaire
- Emergency Generator : générateur de secours
- ACEPU (Alternative Current External Power Unit) : prise de parc AC
- DCEPU (Direct Current External Power Unit) : prise de parc DC

5.3.2 LE STOCKAGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE DANS LES HELICOPTERES

En termes de puissance installée, les hélicoptères sont assez proches des petits avions civils et des avions militaires. Les réseaux électriques de ces aéronefs sont pour la plupart identiques et les éléments de stockage également. Ces derniers sont connectés au bus continu 28V.

Dans un hélicoptère, les batteries d'accumulateurs ont pour fonction de fournir l'alimentation électrique autonome pour le démarrage de l'APU ou celui des turbines (leur démarrage est électrique, contrairement à un avion, et s'effectue via les starters connectés au réseau AC). Les batteries ont en charge également l'alimentation électrique d'urgence en cas de défaillance ou panne du système de génération électrique en vol. La technologie d'accumulateurs employée est Ni-Cd pour fournir la puissance nécessaire au démarrage des moteurs et l'énergie en cas de secours. Les batteries Ni-Cd ULM® de Saft [43] équipent notamment les hélicoptères Eurocopter EC120/EC145/NH90/EC175. La technologie au lithium est également utilisée mais davantage pour les systèmes d'urgence type sièges éjectables et parachutes de sécurité, alarmes et radiobalises de détresse, dans le cas d'aéronefs militaires.

6 LES MOYENS DE STOCKAGE DE L'ENERGIE POUR LE PROJET

L'architecture de l'aéronef étudié dans le Projet est différente de celle d'un aéronef actuel. L'évolution concerne notamment l'utilisation des éléments de stockage. Dans un aéronef actuel, les éléments de stockage ont pour fonction de fournir l'alimentation électrique autonome pour le démarrage des moteurs ou de l'APU et de fournir l'alimentation électrique d'urgence en cas de défaillance ou de panne du système de génération électrique en vol. Dans le Projet, leur utilisation ne se limitera pas à ces deux seules fonctions. En effet, il est envisagé d'utiliser ces SSE tout au long de la mission de l'aéronef, et non plus seulement au début de la mission (démarrage des moteurs) ou en cas de secours.

L'architecture étudiée est donc une architecture à deux bus (bus n°1 et bus n°2) reliés entre eux par l'intermédiaire d'un convertisseur. Cette architecture est présentée en Figure I-23. La poutre électrique comprend les moyens de génération, de stockage, de distribution et de conversion de l'énergie électrique pour l'aéronef. Les moyens de génération électrique sont des Starter/Generators (S/G) et les éléments de stockage sont du type batteries d'accumulateurs (ACC) et packs de supercondensateurs (SCAP). Ces divers éléments peuvent être connectés directement aux bus ou par l'intermédiaire d'un convertisseur.

Un des objectifs principaux du Projet est la mise en œuvre d'une gestion de l'énergie électrique, dans le but de récupérer de l'énergie, de minimiser la masse embarquée dans l'aéronef et de limiter le prélèvement de puissance sur les générateurs, donc *in fine* de réduire la consommation en kérosène. Pour atteindre ces objectifs et particulièrement celui de minimisation de la masse embarquée, la maîtrise de la tension des bus continus est essentielle. En effet, si la tension des bus varie peu, la taille des filtres en entrée des actionneurs connectés sur les bus peut être réduite, d'où un gain de masse substantiel. La gestion d'énergie, développée pour le Projet par Bienaimé [45], prévoit de solliciter les éléments de stockage pour réguler la tension des bus. En outre, pour réaliser une gestion de l'énergie efficace, l'utilisation d'éléments de stockage complémentaires en termes de performances dynamiques est nécessaire. La stratégie de gestion de l'énergie qui est élaborée pour le Projet consiste à décomposer les besoins énergétiques de la poutre électrique en trois niveaux : impulsions, transitoires et permanents et de solliciter les trois types de sources disponibles en fonction de ces niveaux. Les supercondensateurs, sources de puissance, sont plus aptes à fournir des pics de puissance, donc de répondre aux besoins impulsions de la poutre. Dans un registre moins dynamique, les accumulateurs sont ici considérés comme une source d'énergie, capable de répondre aux besoins transitoires de la poutre. Ainsi, les générateurs n'ont plus à assurer qu'un régime permanent, pour lequel la dérivée de la puissance est quasiment nulle, ce qui permet une certaine limitation du prélèvement de puissance sur ceux-ci.

CONFIDENTIEL

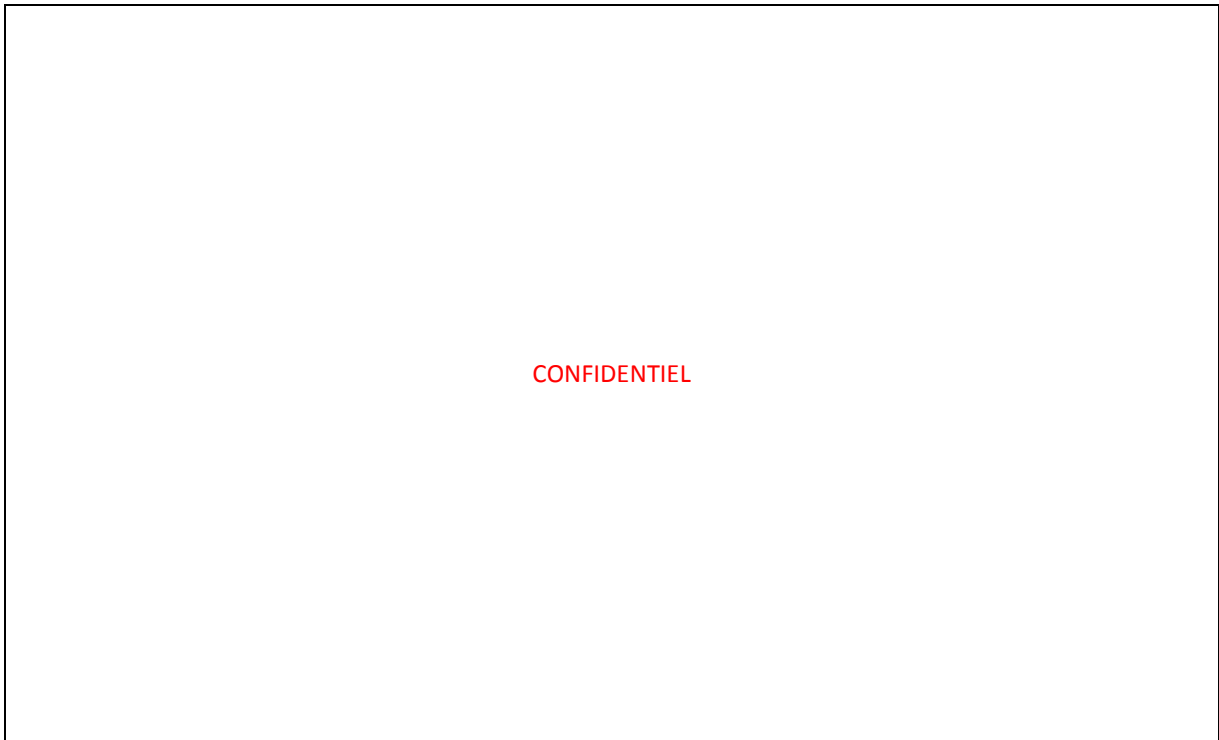
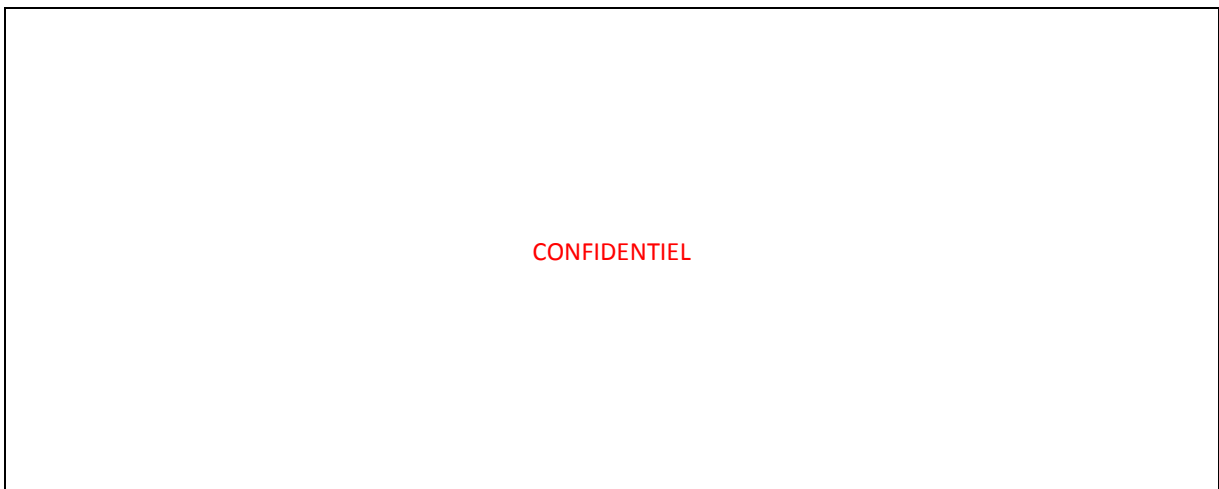


FIGURE I-23 : ARCHITECTURE DE LA POUTRE ELECTRIQUE



En conclusion de ce premier chapitre, l'état de l'art sur les moyens décentralisés et réversibles pour le stockage de l'énergie électrique et leur comparaison ont mis en avant l'intérêt d'hybrider des composants présentant des caractéristiques complémentaires. Le Projet donne l'opportunité de faire évoluer l'architecture électrique d'un aéronef en intégrant de nouvelles technologies pour stocker l'énergie et en leur attribuant de nouvelles fonctions (notamment dans la gestion de l'énergie embarquée). Les supercondensateurs et les accumulateurs électrochimiques au lithium identifiés pour le Projet sont des composants de technologies nouvelles pour l'Application, et cela d'autant plus dans le cadre d'une utilisation tout au long d'une mission. Il est donc nécessaire de caractériser expérimentalement ces composants dans des conditions en lien avec l'Application. De plus, la mise au point d'une stratégie de gestion de l'énergie et sa validation implique la simulation de la poutre complète, dont les éléments de stockage. Les chapitres II et III sont donc dédiés à la caractérisation et à la modélisation des accumulateurs électrochimiques et des supercondensateurs.

PREAMBULE AUX CHAPITRES 2 ET 3

Dans le cadre du Projet, plusieurs études sont menées sur le réseau électrique de bord. Une étude globale consiste à gérer les échanges d'énergie entre les différentes sources en présence et les charges consommatrices. Ce type d'étude nécessite d'appréhender le fonctionnement de la poutre dans son intégralité. D'autres études consistent en l'analyse plus fine et locale du comportement d'un composant dans son environnement, ou en l'analyse de la qualité du réseau de bord (stabilité des bus, Compatibilité Electro-Magnétique). Toutes ces études sont réalisées en premier lieu par simulation de la poutre électrique, puis sur un démonstrateur. La simulation numérique de la poutre nécessite une modélisation de celle-ci, intégrant des modèles de granularité diverse compte-tenu des niveaux de précision attendue pour ces études. Les travaux présentés dans les chapitres II et III, relatifs à la caractérisation et à la modélisation des éléments de stockage (accumulateurs électrochimiques et supercondensateurs), sont une contribution à la modélisation de la poutre complète.

La première étape pour modéliser un système de stockage d'un point de vue électrique réside dans le choix de la modélisation la plus adaptée à l'étude à mener. On distingue différentes modélisations [27] :

- La modélisation comportementale, ou de type « boîte noire », est beaucoup utilisée dans le domaine du génie électrique. Dans ce cas, le système à modéliser est défini mathématiquement, par exemple par une fonction de transfert ou un réseau de neurones, où les données de sortie sont reliées aux données d'entrée du système. Ce type de modèle ne décrit pas les phénomènes physiques internes au système et peut être utilisé pour la mise au point de la commande du système.
- La modélisation de représentation consiste à établir des lois empiriques (cartographies, ...) pour relier les variables d'état du système à des contraintes de fonctionnement. L'exploitation de ce type de modèle est limitée car le modèle est implicitement lié aux conditions expérimentales à partir desquelles il a été élaboré.
- La modélisation par circuits électriques équivalents permet, grâce à l'analogie entre les domaines physico-chimique et électrique, de décrire le comportement du système par un circuit électrique. Suivant son niveau de précision, le modèle permet de décrire le comportement global du système ou les phénomènes physiques internes au système.
- La modélisation de connaissance décrit localement les phénomènes de transfert (de charge, de chaleur, de matière, ...) par des équations aux dérivées partielles. Ce type de modèle renseigne précisément le fonctionnement du composant, il est utilisé notamment pour la conception.

Pour cette étude, on retiendra la modélisation par circuits électriques équivalents qui présente l'avantage de décrire physiquement le comportement du système, et donne la possibilité de prendre en compte des non-linéarités et l'influence des conditions de fonctionnement (effet de la température par exemple). Ces modèles par circuits électriques équivalents, plus ou moins complexes, sont très répandus dans les études de systèmes électriques. Dans la littérature [3], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], une multitude de modèles par circuits équivalents a été développée. Le choix du type de modèle est lié à son exploitation et à l'application [42]. Dans le Projet, les modèles sont développés dans l'optique d'établir une stratégie de gestion de l'énergie de la poutre complète d'une part, et d'analyser le fonctionnement des réseaux électriques d'autre part. Il convient donc d'élaborer un modèle « simple » (modèle quasi-statique ou modèle moyen) adapté à la gestion d'énergie et un modèle plus « complexe » (modèle dynamique) dont la précision permet une analyse de la qualité du réseau de bord.

En aéronautique [42], [44], quatre niveaux de modélisation ont été définis pour les systèmes électriques des avions (cf. Figure I-24) :

- Un modèle « architectural » est utilisé au niveau du système complet pour élaborer des bilans énergétiques globaux.
- Un modèle « fonctionnel » est représentatif du comportement en régime permanent et lors des phases transitoires, et est utilisé pour valider l'architecture du système et sa stabilité.
- Un modèle « comportemental » est représentatif des formes d'ondes. Il est plus précis que le modèle fonctionnel pour traduire le comportement en transitoire du système dans la mesure où les commutations et les harmoniques sont modélisées.
- Un modèle « composant » détaille le comportement de chacun des composants du système. De par son niveau de précision, il est difficilement intégrable dans un modèle du système complet.

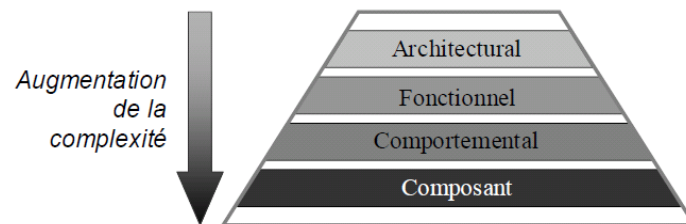


FIGURE I-24 : CLASSIFICATION DES NIVEAUX DE MODELISATION DES SYSTEMES ELECTRIQUES DANS L'AERONAUTIQUE

Par rapport à l'Application, les modèles fonctionnel et comportemental sont en adéquation avec les attentes du Projet : le modèle fonctionnel correspond à un modèle simple, suffisant pour l'étude de gestion de l'énergie. Dans cette optique, le modèle doit être facile à implanter et ne doit pas pénaliser le temps de simulation de la poutre complète. Le modèle comportemental correspond à un modèle plus complexe et plus précis, nécessaire pour appréhender les phénomènes transitoires de la poutre et analyser la qualité et la stabilité du réseau. Ce modèle est généralement plus difficile à mettre en œuvre en termes de simulation, nécessitant alors d'adapter la fenêtre temporelle sur laquelle l'étude est réalisée. Quel que soit le modèle, la modélisation est réalisée dans le souci de faciliter sa simulation (en tenant compte des spécificités du logiciel) et de favoriser l'interprétation des résultats issus de sa simulation.

La modélisation est réalisée à partir de caractérisations expérimentales. Les procédures d'essais sont élaborées en lien avec le modèle à établir. Les essais de caractérisation sont donc menés en vue d'exploiter les résultats pour la compréhension du comportement électrique du système et d'identifier les paramètres des modèles. Les chapitres II et III sont dédiés à la caractérisation en vue de la modélisation des accumulateurs électrochimiques et supercondensateurs.

II. CHAPITRE 2 : CARACTERISATION ET MODELISATION DES ACCUMULATEURS ELECTROCHIMIQUES

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des accumulateurs électrochimiques dans l'optique de leur modélisation. Deux modèles sont retenus en fonction de leur pertinence dans le cadre de l'Application. Le premier modèle est un modèle quasi-statique, issu du modèle simple de Thévenin et amélioré dans le sens où les non-linéarités sont prises en compte. Ce modèle fonctionnel est suffisant pour être intégré dans le modèle de la poutre complète, dans la perspective de simuler son fonctionnement global. Le second modèle est un modèle dynamique, c'est-à-dire qu'il traduit plus finement le comportement fréquentiel du composant que le modèle quasi-statique. Ce modèle comportemental est nécessaire pour l'étude du système dans des phases transitoires ou à des points de fonctionnement particuliers. Le choix de ces modèles oriente vers le type de caractérisations expérimentales à réaliser. Plusieurs essais sont donc menés pour appréhender le comportement électrique des accumulateurs : caractérisations par chronopotentiométrie et par Spectrométrie d'Impédance Electrochimique (SIE). Les résultats expérimentaux sont alors analysés afin d'identifier les paramètres des modèles. En outre, ces essais sont réalisés dans des conditions expérimentales qui sont cohérentes avec l'application finale et qui définissent le domaine de validité des modèles. Ils sont réalisés sur les cellules qui composent la batterie d'accumulateurs. Pour effectuer ces caractérisations dans des conditions de test identiques, un banc d'essais a été réalisé. Ce chapitre débute par une description de l'équipement de test et des composants testés. Puis les modèles retenus sont détaillés et pour chacun, les résultats des caractérisations et des modélisations, ainsi que les méthodes pour y parvenir, sont présentés.

1 EQUIPEMENTS DE TEST ET ELEMENTS TESTES

1.1 BANC DE TEST DES ACCUMULATEURS

Un banc de test, spécialement dédié à la caractérisation d'éléments de stockage, a été réalisé au sein du laboratoire.

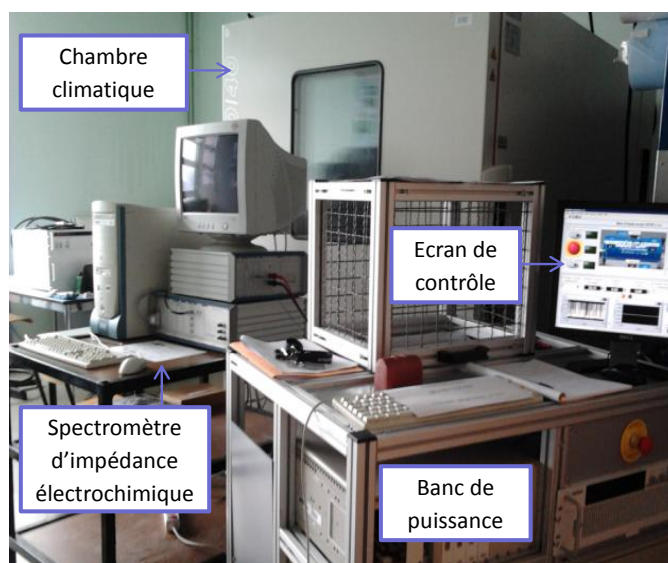


FIGURE II-1 : BANC DE TEST POUR LES ACCUMULATEURS

Il est composé d'un banc de puissance, d'un superviseur avec une interface graphique, d'un système d'acquisition et d'autres moyens de mesure spécifiques en fonction des essais à réaliser tels qu'un oscilloscope et un impédancemètre. Le dispositif de test comprend également une chambre climatique de marque Secasi Technologies, de type ST1500/40, pour les essais en température.

1.1.1 BANC DE PUISSANCE

Le banc de puissance est composé d'une alimentation Xantrex 0-10V – 0-600A, d'une charge électronique TDI 10V – 120A – 800W et d'un circuit électrique adapté. Les composants du banc ont été choisis en fonction des essais à mener et des composants à tester. En effet, les essais à effectuer sont des essais de puissance, pendant lesquels la tension aux bornes de l'équipement sous test (EST) peut être relativement faible (de 0,5V à quelques Volt) tandis que le courant peut atteindre plusieurs dizaines d'Ampère.

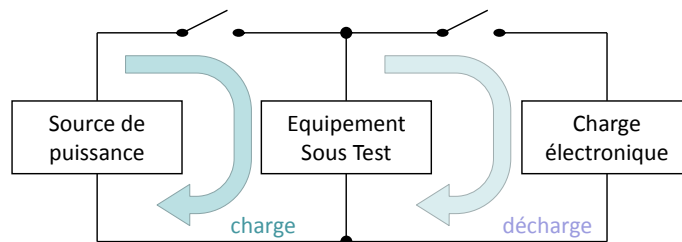


FIGURE II-2 : SYNOPTIQUE DU BANC DE PUISSANCE

Le banc de puissance (cf. Figure II-2) est donc composé d'un circuit de charge (la source de puissance alimente l'EST) et d'un circuit de décharge (l'EST alimente la charge électronique). Les composants à tester étant considérés comme des sources de tension, ils seront caractérisés en leur appliquant des sollicitations (charge ou décharge) en courant. Par conséquent, la source et la charge électronique sont pilotées en courant.

1.1.2 SUPERVISEUR

Le banc de test dispose d'un superviseur permettant la commande des circuits de puissance, l'acquisition des grandeurs physiques à suivre et la surveillance du système. La supervision est réalisée avec le logiciel Labview®.

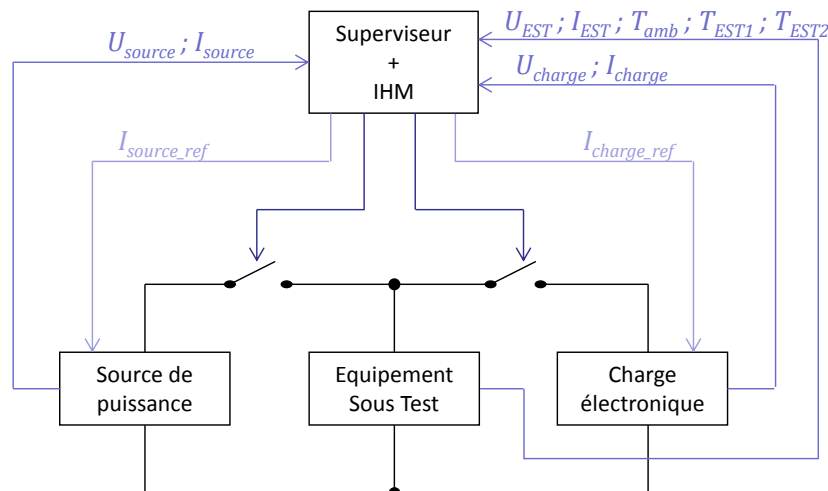


FIGURE II-3 : SYNOPTIQUE DU BANC DE TEST (PUISSANCE ET SUPERVISION)

La première fonction du superviseur est de gérer les circuits de charge et de décharge de l'EST en commandant les contacteurs de puissance associés et en envoyant à la source et à la charge une consigne de courant, respectivement de charge (I_{source_ref}) et de décharge (I_{charge_ref}).

La deuxième fonction du superviseur est la gestion des grandeurs mesurées. L'acquisition de ces grandeurs est réalisée par un système PXI avec un châssis SCXI (National Instruments). La fréquence d'acquisition est de 1,25Hz. Les grandeurs telles que la tension, le courant, la température sont nécessairement suivies lors d'un essai, elles sont donc mesurées et renvoyées au superviseur. On mesure la tension et le courant au niveau de la source (U_{source} et I_{source}) et au niveau de la charge (U_{charge} et I_{charge}). Concernant le composant à tester, on mesure sa tension U_{EST} , son courant I_{EST} par l'intermédiaire d'un capteur de courant (sonde à effet Hall de type LEM) et sa température en surface (T_{EST1} et T_{EST2}). On relève également la température ambiante (T_{amb}) de la chambre climatique. Pour les mesures thermiques, des capteurs de température (thermocouples de type K) sont placés en surface de l'EST au droit des bornes positive et négative.

La troisième fonction du superviseur est la surveillance du système. Il intègre une fonction de détection des défauts (dépassement des seuils de tension par exemple) et une fonction de protection lorsqu'un défaut est détecté (alerte et ouverture du circuit de puissance). Les seuils de tension et de température saisis dans le superviseur respectent les préconisations d'utilisation données par les constructeurs.

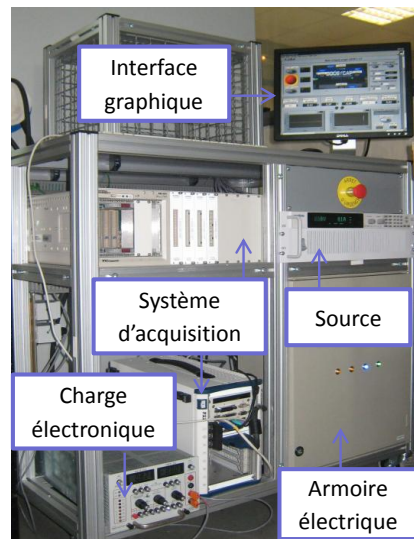


FIGURE II-4 : BANC DE PUISSANCE ET SYSTEME D'ACQUISITION

Enfin, le superviseur dispose d'une interface graphique, sur laquelle sont affichées les grandeurs mesurées et leur évolution en fonction du temps, et les alertes lorsque les limites des composants sont atteintes. A partir de cette Interface Homme-Machine (IHM), les consignes de courant sont données à la source ou à la charge. Ces consignes peuvent être constantes ou des profils de courants.

1.1.3 IMPEDANCEMETRE

L'impédancemètre utilisé pour réaliser les spectrométries d'impédance électrochimique est un spectromètre IM6 de marque Zahner®, commandé par un logiciel développé par Thalès. Une interface graphique (Cf. Figure II-5) permet de saisir les caractéristiques de la spectrométrie, à savoir le mode (potentiostat ou galvanostat), l'amplitude de la sinusoïde à appliquer, la plage de fréquence que l'on souhaite balayer, le nombre de mesures effectuées par période et le nombre de points par décade. Le logiciel permet de suivre l'évolution des

grandeurs principales (tension et courant) et, en fin de relevé, trace l'impédance complexe sous forme de diagrammes de Bode⁷ ou de Nyquist⁸.

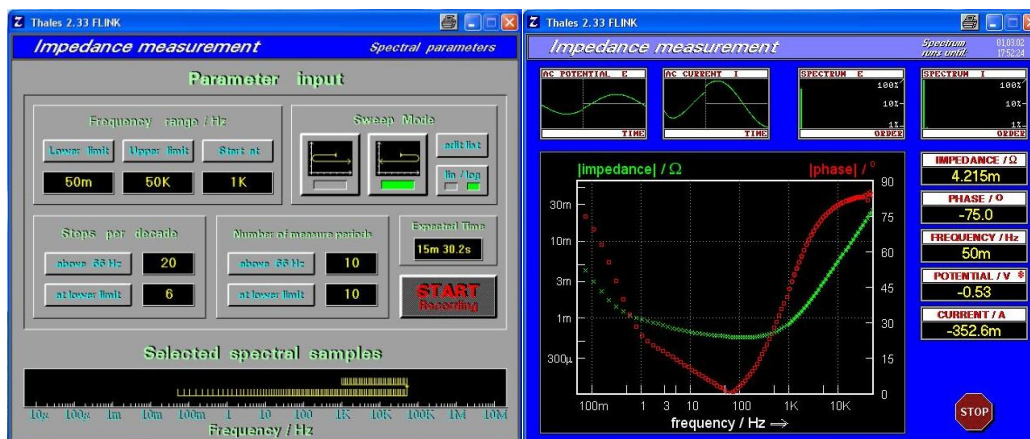


FIGURE II-5 : INTERFACE GRAPHIQUE DE L'IMPEDANCEMETRE

1.2 ACCUMULATEURS TESTES

Dans le Projet, deux batteries d'accumulateurs équipent la poutre électrique : une batterie d'accumulateurs (ACC1) est connectée au bus n°1 (bus1) via un convertisseur DC/DC et une batterie d'accumulateurs (ACC2) est directement connectée au bus n°2 (bus2). La batterie du bus n°2 est de technologie Ni-Cd. Ces accumulateurs Ni-Cd étant relativement bien connus car massivement employés dans l'aéronautique et étant concernés par la directive européenne 2006/66/CE (Cf. I.3.1.3.2.1), leur étude présente assez peu d'intérêt. Dans ce chapitre, l'étude porte spécifiquement sur la batterie d'accumulateurs du bus n°1, qui a été dimensionnée et développée spécialement pour le Projet. Il s'agit d'une batterie d'accumulateurs Lithium-ion polymère, formée d'une association de plusieurs cellules en série et en parallèle de manière à atteindre les performances énergétiques attendues dans le Projet (cf. Figure II-6). La cellule unitaire est une cellule Kokam [38] de capacité 4,8Ah (cf. Figure II-7), dont les caractéristiques, données par le constructeur, sont données en Annexe 2 et synthétisées dans le Tableau II-1. Les essais de caractérisation sont effectués sur les cellules unitaires d'accumulateurs.

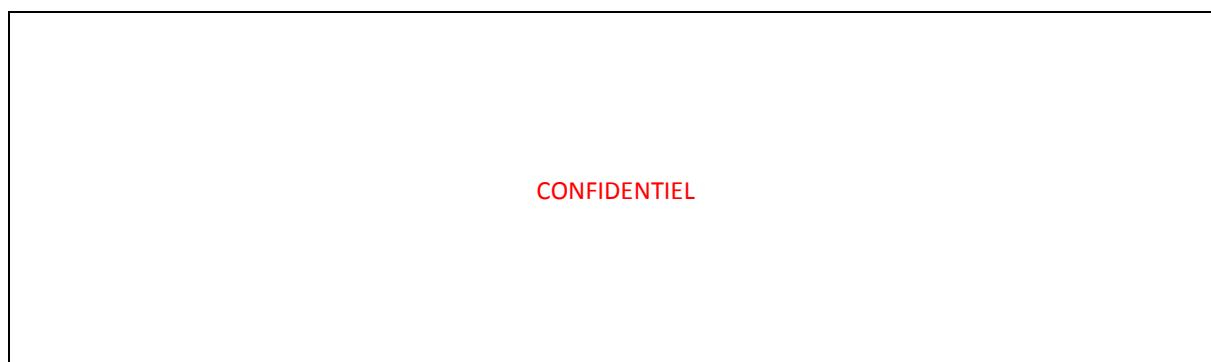


FIGURE II-6 : BATTERIE D'ACCUMULATEURS LIPO

⁷ Le diagramme de Bode représente graphiquement le gain [dB] (ou le module) et la phase [rad] d'un système, en fonction de la pulsation [rad.s⁻¹] en échelle logarithmique.

⁸ Le diagramme de Nyquist représente le lieu de l'impédance dans le plan complexe : en abscisse la partie réelle [Ω] et en ordonnée la partie imaginaire [Ω]



FIGURE II-7 : CELLULE D'ACCUMULATEUR LITHIUM-ION POLYMERE 4,8 AH

| | | |
|---|------|-----------------------------------|
| Accumulateur | | Lithium-ion polymère |
| Fabricant | | Kokam |
| Référence commerciale | | SLPB 11043140H4 (high power cell) |
| Capacité nominale | [Ah] | 4,8 ^(*) |
| Tension nominale | [V] | 3,7 |
| CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT EN CHARGE | | |
| Courant maximal en continu en charge | [A] | 9,6 (=2C) |
| Tension maximale | [V] | 4,2 |
| Température d'utilisation | [°C] | de 0 à +40 |
| CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT EN DECHARGE | | |
| Courant maximal en continu en décharge | [A] | 96 (=20C) |
| Courant maximal en pic en décharge | [A] | 192 (=40C) |
| Tension minimale | [V] | 2,7 |
| Température d'utilisation | [°C] | de -20 à +60 |
| Dimensions (longueur x largeur x épaisseur) | [mm] | 140 x 42,5 x 11 |
| Masse | [g] | 115 |

TABLEAU II-1 : SPECIFICATIONS TECHNIQUES D'UN ACCUMULATEUR LI-ION POLYMERE 4,8 AH (DONNEES CONSTRUCTEUR) [38]

(*) La capacité nominale est déterminée lors d'une décharge au régime de 0,5C entre la tension maximale (4,2V) et la tension minimale (2,7V) à 25°C.

Grâce aux moyens de test décrits précédemment, une série d'essais est réalisée sur les éléments d'accumulateurs électrochimiques Li-ion polymère. Ces caractérisations expérimentales ont pour but d'appréhender le comportement électrique de ces composants dans différentes conditions en réponse à des sollicitations électriques diverses. Dans les paragraphes II.3 et II.4, les modèles quasi-statique et dynamique sont présentés et les protocoles de test ainsi que les méthodologies de modélisation sont détaillés. Ces deux modèles, qu'ils soient fonctionnel ou comportemental, intègrent la notion d'état de charge (SOC : State Of Charge) et prennent en compte la variation de certains paramètres en fonction de l'état de charge de l'accumulateur notamment. Or l'estimation de l'état de charge ne peut se faire sans connaître la capacité nominale de l'accumulateur. La détermination expérimentale de la capacité nominale fait donc l'objet du paragraphe suivant.

2 CARACTERISATION POUR LA DETERMINATION DE LA CAPACITE

Comme définie dans le paragraphe I.3.1.2, la capacité nominale C_n d'un accumulateur équivaut à la capacité de stockage obtenue au régime nominal de décharge et respectant les critères initiaux et finaux du constructeur. La capacité restituée C_R correspond à la quantité de charge restituée lors d'une décharge à régime nominal en respectant le critère final défini par le constructeur, le critère initial n'étant pas forcément un accumulateur complètement chargé. La capacité restituée est donc analogue à la capacité nominale, au critère initial près. La capacité C_S est équivalente à la quantité de charge fournie à l'accumulateur lors du protocole de charge.

2.1 PROCEDURE DE DETERMINATION DE LA CAPACITE

Afin de déterminer la capacité d'un accumulateur, un protocole expérimental a été élaboré sur la base des préconisations du constructeur. Pour être cohérent avec la définition de la capacité nominale rappelée auparavant et avec les données du constructeur, la capacité sera déterminée lors de la phase de décharge de l'accumulateur. Cela nécessite que l'accumulateur soit complètement chargé au préalable.

La charge de l'accumulateur se fait en appliquant un courant constant correspondant au régime de charge de 1C jusqu'à ce que la tension à ses bornes atteigne sa valeur maximale U_{acc_max} . La tension est ensuite régulée autour de sa valeur maximale pendant une durée suffisante pour que le courant de charge tende vers zéro (cf. Figure II-8). Lorsque le courant de charge tend vers zéro et que la tension est régulée à sa valeur maximale, l'accumulateur est considéré comme pleinement chargé [26]. La décharge pour déterminer la capacité de stockage est effectuée à courant constant (typiquement au régime de décharge nominal de 1C). Ce courant de décharge est appliqué jusqu'à ce que la tension atteigne sa valeur minimale U_{acc_min} .

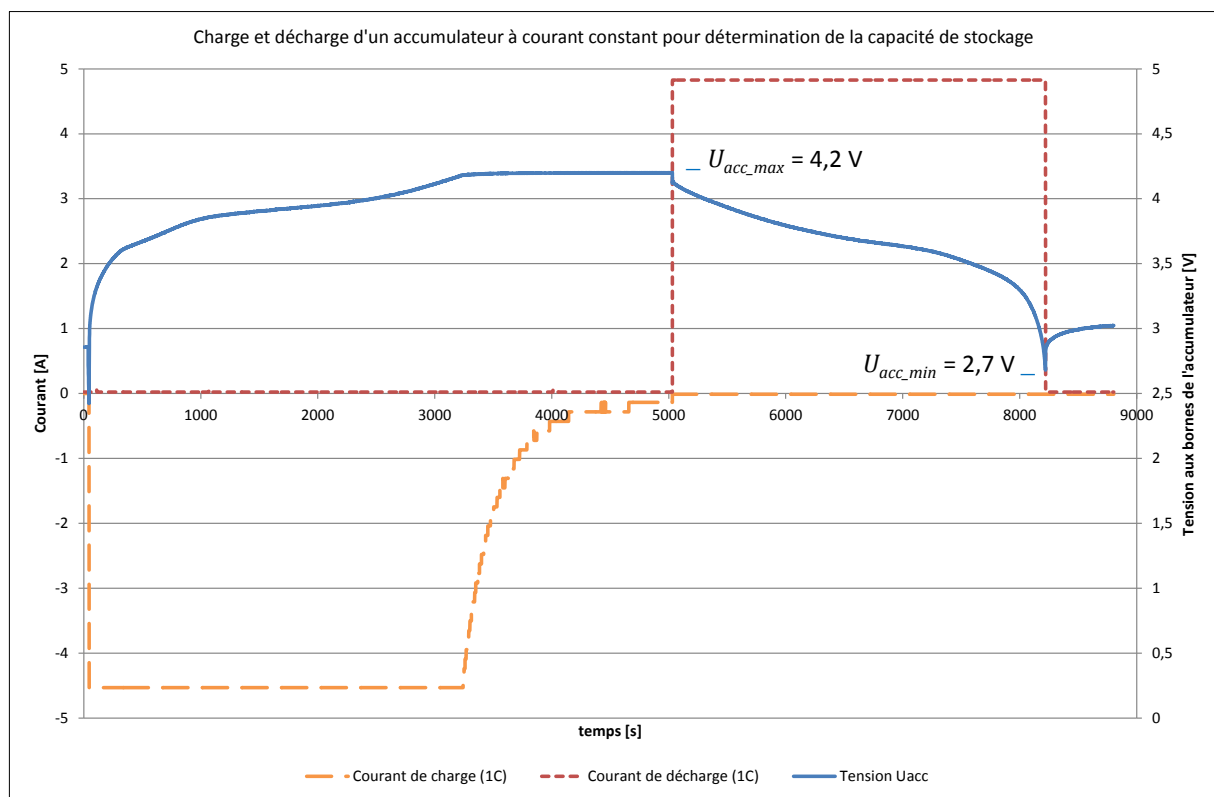


FIGURE II-8 : RELEVÉ DES COURANTS DE CHARGE ET DECHARGE ET DE LA TENSION AUX BORNES D'UNE CELLULE D'ACCUMULATEUR

Les paramètres suivis au cours des essais sont les paramètres électriques tels que les courants de charge et de décharge et la tension aux bornes de l'accumulateur, et les paramètres environnementaux comme la température en surface de l'accumulateur (deux points de mesure) et la température ambiante (chambre climatique).

Le courant de charge appliqué pour ces essais est égal à 1C. Les décharges sont effectuées à plusieurs régimes de décharge : 0,5C, 1C et 2C.

Remarque : les relevés sont effectués en charge et en décharge. La capacité C_s , correspondant à la quantité de charge emmagasinée lors de la période de charge, peut donc être déterminée pour comparaison avec la capacité nominale C_n .

2.2 RESULTATS DE LA CARACTERISATION

Les essais ont été effectués à trois régimes de décharge et la caractérisation a été faite deux fois à 1C. La Figure II-9 présente l'évolution de la tension aux bornes de l'accumulateur pendant la décharge à courant constant. La tension initiale est de 4,2V pour chaque essai. On note une chute de tension dès l'application du courant de décharge, dont l'amplitude est fonction du régime de décharge. Les résultats des caractérisations sont synthétisés dans le Tableau II-2. La capacité de stockage est obtenue par l'intégration du courant pendant la période de décharge. La température indiquée dans le tableau est la température ambiante lors de l'essai et la variation de température ΔT correspond à la différence entre la température maximale en surface de l'accumulateur et la température minimale (proche de la température ambiante).

| | <i>Courant</i> | <i>temps</i> | <i>Capacité</i> | <i>Température</i> | ΔT |
|---------------|----------------|--------------|-----------------|--------------------|------------|
| <i>Régime</i> | [A] | [s] | [Ah] | [°C] | [°C] |
| 0,5C | 2,43 | 6335 | 4,3 | 18,5 | 2 |
| 1C (1) | 4,83 | 3125 | 4,2 | 18 | 4,5 |
| 1C (2) | 4,83 | 3170 | 4,25 | 21,5 | 6,7 |
| 2C | 9,63 | 1545 | 4,15 | 17 | 9,3 |

TABLEAU II-2 : RESULTATS DES ESSAIS DE DETERMINATION DE LA CAPACITE DE STOCKAGE DE LA CELLULE 4,8AH

Remarque : la capacité C_S déterminée lors du protocole de charge est du même ordre de grandeur que la capacité nominale mesurée en décharge.

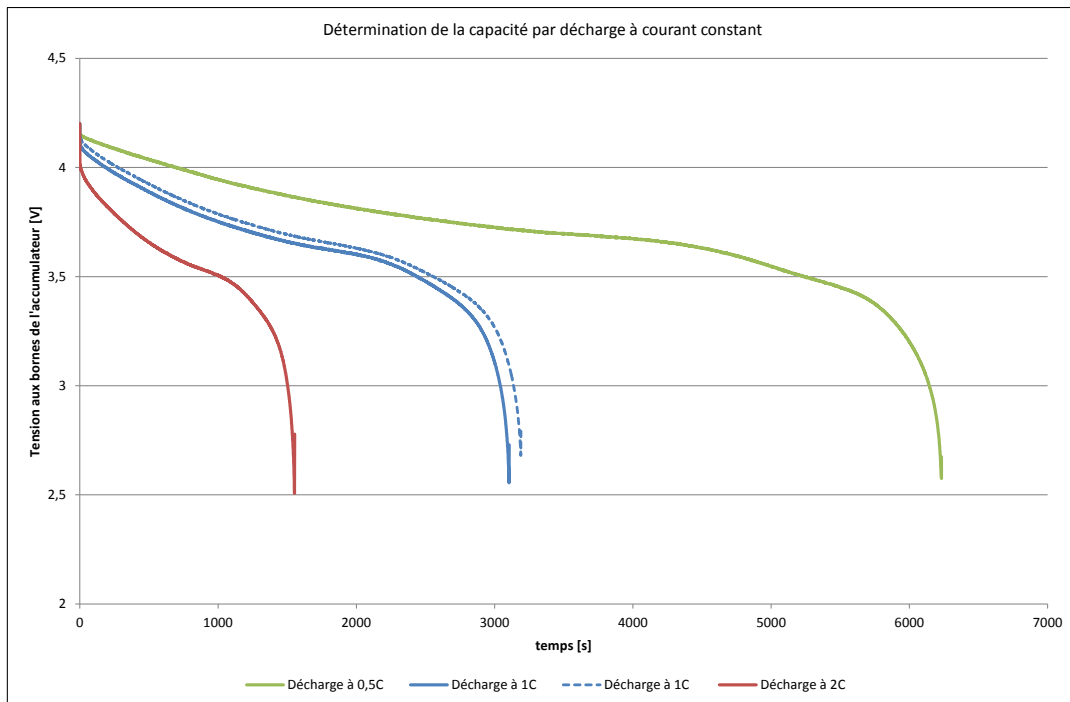


FIGURE II-9 : RELEVÉ DE LA TENSION AUX BORNES DE L'ACCUMULATEUR A DIFFERENTS REGIMES DE DECHARGE A 20°C

La capacité de stockage déterminée au cours de ces essais est de l'ordre de 4,3Ah, elle est inférieure à celle donnée par le constructeur (Cf. Tableau II-1), mesurée à 0,5C. Néanmoins, les résultats des quatre caractérisations sont cohérents les uns par rapport aux autres. De plus, l'évolution de la tension mesurée est semblable à celle donnée par le constructeur (Cf. Annexe 2). Pour la suite des essais, la capacité nominale considérée est donc 4,3Ah à 20°C.

3 CARACTERISATION POUR LA DETERMINATION DU MODELE QUASI-STATIQUE

Cette partie est consacrée à la caractérisation des accumulateurs en vue d'identifier les paramètres du modèle quasi-statique. Dans un premier temps, ce modèle dit « de Thévenin » est présenté. Ensuite le protocole de test associé à ce modèle et la méthode d'identification des paramètres sont décrits, respectivement dans les paragraphes II.3.2 et II.3.3. Enfin, les résultats des expérimentations et des simulations du modèle sont détaillés et analysés.

3.1 PRESENTATION DU MODELE QUASI-STATIQUE

Le modèle quasi-statique est un modèle fonctionnel au sens aéronautique du terme (selon la définition donnée en préambule des chapitres II et III). Il s'agit d'un modèle par circuit électrique équivalent composé d'une tension à vide (ou f.e.m.) et d'une résistance en série. Dans la littérature, ce modèle est couramment utilisé dans le cadre de modélisation de systèmes énergétiques multi-physiques intégrant une batterie d'accumulateurs et notamment pour les études de gestion de l'énergie dans des systèmes hybrides [56], [46], [50]. En effet, de par sa simplicité, ce modèle de Thévenin est facilement mis en œuvre dans un système multi-physique et multi-échelle. Cependant, il peut être amélioré en considérant l'évolution de ses paramètres en fonction de contraintes telles que l'état de charge et la température.

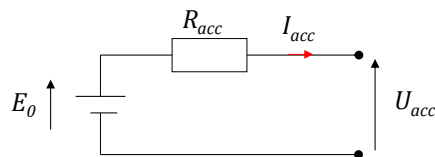


FIGURE II-10 : MODELE QUASI-STATIQUE D'UN ACCUMULATEUR

La convention utilisée pour ce modèle est la convention « générateur ». Le modèle est composé de :

- E_0 : tension à vide [V] (ou Open Circuit Voltage (OCV) en anglais)
- R_{acc} : résistance en série [Ω] (ou Equivalent Serial Resistance (ESR) en anglais)

3.2 PROCEDURE DE CARACTERISATION

La caractérisation de l'accumulateur est effectuée par chronopotentiométrie, qui consiste à appliquer à l'accumulateur un courant et à mesurer l'évolution de la tension à ses bornes en réponse à la sollicitation en courant. La procédure de test associée au modèle quasi-statique est une décharge par palier de l'accumulateur préalablement chargé, en lui appliquant des créneaux successifs de courant.

Les conditions initiales à l'essai sont de deux ordres : premièrement, l'accumulateur est complètement chargé, conformément à la procédure de charge décrite dans le paragraphe II.2.1 définissant la caractérisation en vue de la détermination de la capacité de stockage ($U_{acc,max} = 4,2V$) ; deuxièmement, l'accumulateur est conditionné en chambre climatique à la température de l'essai pendant le temps nécessaire à son équilibre thermique. L'essai est réalisé à trois températures : 0°C, 20°C et 40°C. Les températures de 0°C et 40°C sont respectivement les températures minimale et maximale préconisées par le constructeur [38].

Un courant continu et constant de décharge (égal au courant nominal, soit 1C) est appliqué à l'accumulateur jusqu'à ce que la tension à ses bornes atteigne le palier de tension souhaité. Ainsi, la décharge à courant constant se fait par palier de tension de 0,2V, depuis la tension maximale 4,2V à la tension minimale $U_{acc,min}$. A chaque palier, on détermine l'état de charge correspondant à la durée de décharge, la f.e.m. après l'équilibre des charges et les paramètres du circuit électrique équivalent.

3.3 METHODE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE QUASI-STATIQUE

L'identification des paramètres du modèle quasi-statique est réalisée par une analyse temporelle des grandeurs mesurées lors de la caractérisation. La décharge de l'accumulateur est effectuée par palier, en appliquant un créneau de courant pendant un temps donné. On détermine alors la capacité utile C_u restituée par l'accumulateur pendant cette période et l'état de charge SOC correspondant en adaptant l'équation I-17 comme suit :

$$SOC = 1 - \frac{C_u}{C_n} \quad \text{II-1}$$

L'accumulateur étant initialement chargé, $SOC_0 = 100\%$.

A l'issue de l'application du créneau, on relève la tension aux bornes de l'accumulateur U_{acc} . La tension à vide E_0 est mesurée après une période d'équilibre des charges dans l'accumulateur (stabilisation de la tension : variation de la tension inférieure à 0,1%), qui peut durer plusieurs minutes. Ainsi, pour un état de charge donné, on relève la tension à vide et on détermine la résistance série en appliquant l'équation II-2.

$$R_{acc} = \frac{E_0 - U_{acc}}{I_{acc}} \quad \text{II-2}$$

3.4 RESULTATS DE LA CARACTERISATION ET MODELISATION

3.4.1 CARACTERISATION EXPERIMENTALE ET IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE

Dans ce paragraphe, sont présentés les relevés expérimentaux et l'identification des paramètres.

La Figure II-11 présente un relevé du courant de décharge (créneaux de courant) et de la tension aux bornes de l'accumulateur, lors de l'essai à 20°C. En appliquant la relation II-1, on détermine l'évolution de la tension à vide en fonction de l'état de charge. Sur la Figure II-12, cette évolution est représentée pour les trois températures. Il apparaît que la température n'a pas ou peu d'impact sur la relation tension à vide / état de charge de l'accumulateur.

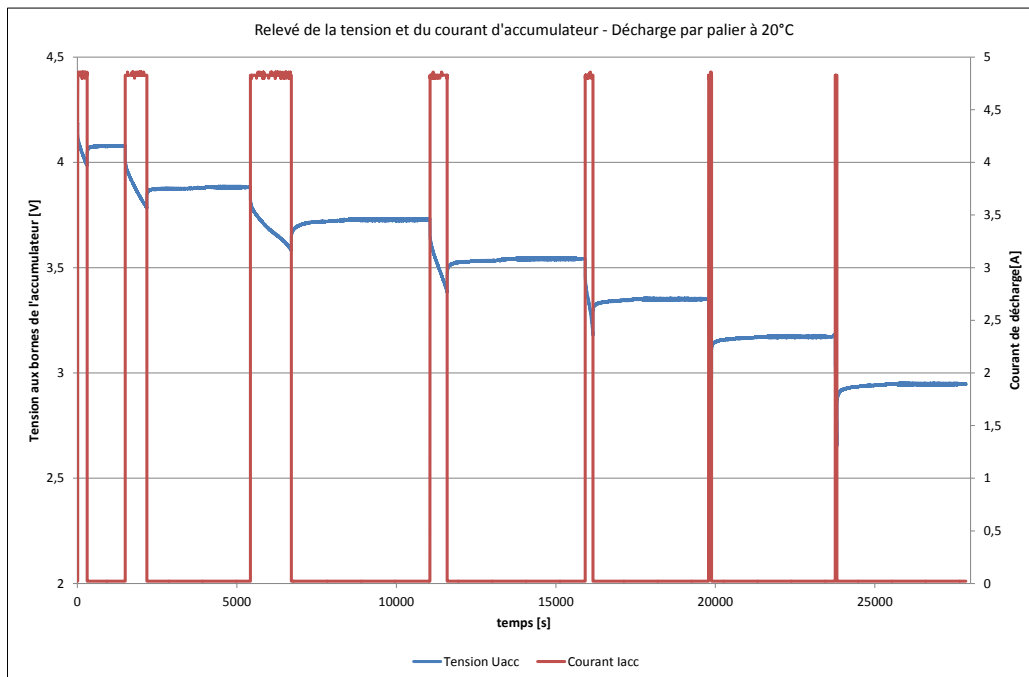


FIGURE II-11 : RELEVÉ DE LA TENSION ET DU COURANT D'ACCUMULATEUR – DÉCHARGE PAR PALIER A 20°C

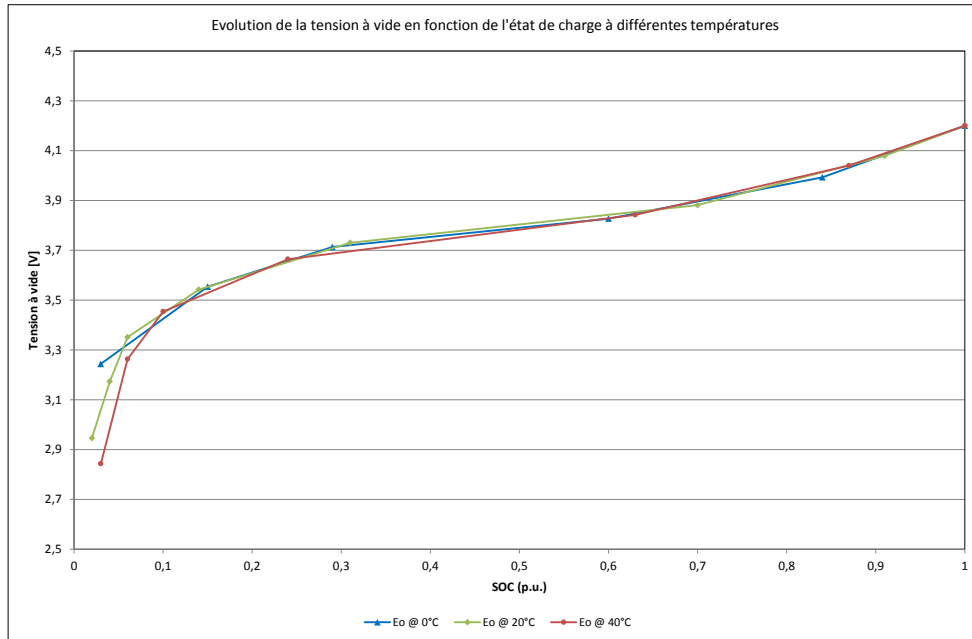


FIGURE II-12 : EVOLUTION DE LA TENSION A VIDE EN FONCTION DE L'ETAT DE CHARGE A DIFFERENTES TEMPERATURES

La modélisation de cette caractéristique (Tension à vide vs. Etat de charge) peut être réalisée de plusieurs manières. On peut déterminer une formulation mathématique pour exprimer la relation entre ces deux variables. Par exemple, un polynôme du troisième degré (dont l'équation est donnée en II-3) a été identifié pour décrire l'évolution de la tension à vide en fonction de l'état de charge. La comparaison de ce modèle avec la f.e.m. relevée expérimentalement est réalisée en Figure II-13.

$$E_0 = 5,1.SOC^3 - 8,8.SOC^2 + 5,1.SOC + 2,8$$

II-3

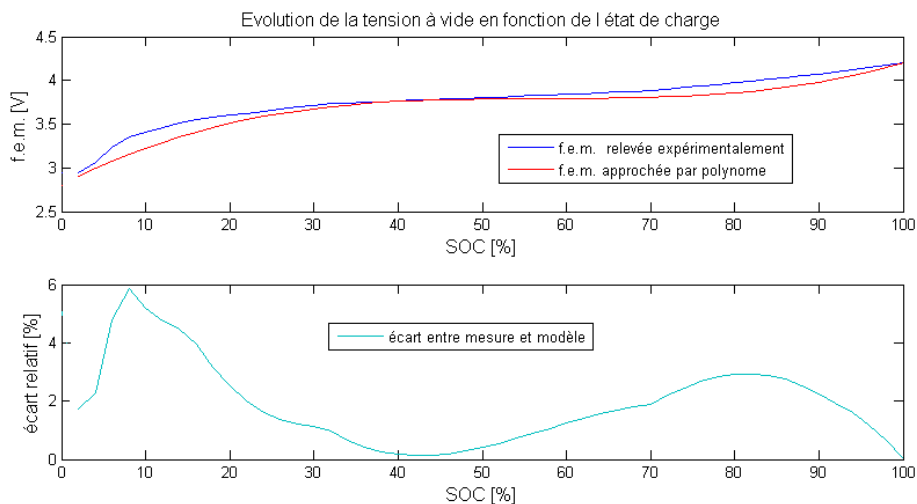


FIGURE II-13 : MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA TENSION A VIDE EN FONCTION DE L'ETAT DE CHARGE

Lorsqu'il est difficile de déterminer une relation mathématique régissant le phénomène physique observé, on peut saisir les grandeurs mesurées dans une table de données, lorsque le logiciel de simulation le permet (typiquement une « look-up table » dans Matlab® Simulink).

A chaque palier, la valeur de la résistance série R_{acc} est déterminée en appliquant la relation II-2. L'évolution de la résistance série est donnée en fonction de l'état de charge de l'accumulateur (Cf. Figure II-14) et en fonction de la tension à vide (Cf. Figure II-15).

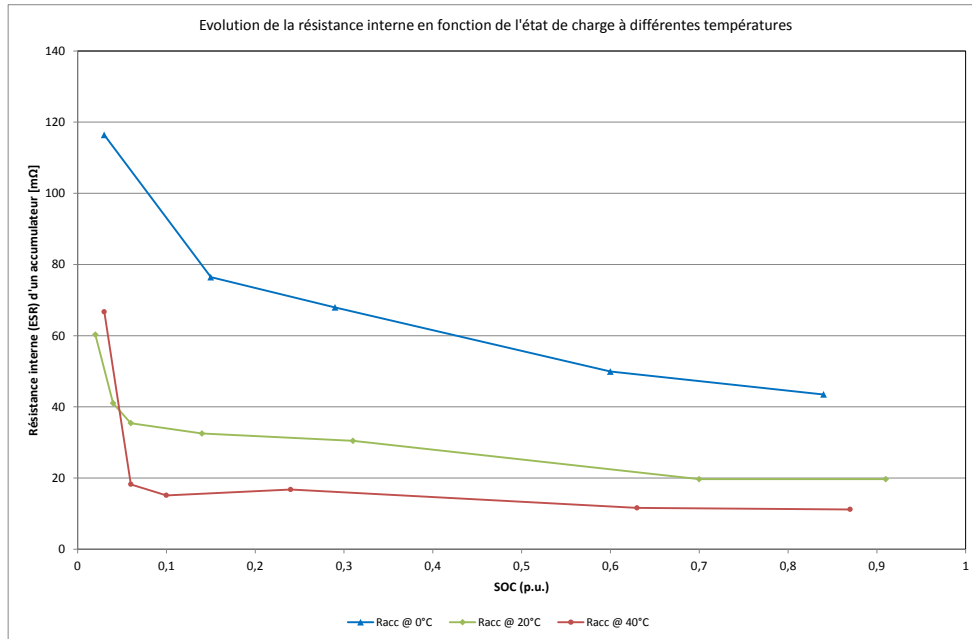


FIGURE II-14 : EVOLUTION DE LA RESISTANCE SERIE EN FONCTION DE L'ETAT DE CHARGE A DIFFERENTES TEMPERATURES

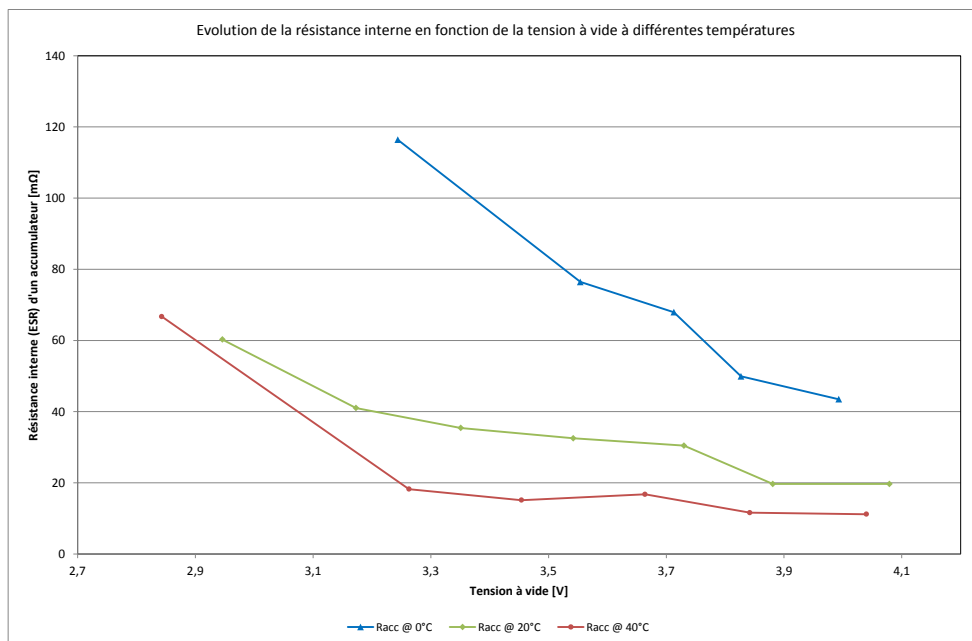


FIGURE II-15 : EVOLUTION DE LA RESISTANCE SERIE EN FONCTION DE LA TENSION A VIDE A DIFFERENTES TEMPERATURES

On remarque que la température a une influence notable sur la valeur de la résistance : celle-ci augmente lorsque la température diminue, ce qui est couramment observé dans un dispositif électrochimique et ce qui explique les mauvaises performances d'un accumulateur à basses températures. En moyenne et pour un état de charge compris entre 30 et 100%, R_{acc} à 40°C équivaut à la moitié de R_{acc} à 20°C et R_{acc} à 0°C est le double de R_{acc} à 20°C. Autrement dit, un accumulateur complètement chargé (sa tension initiale est alors maximale à 4,2V) auquel on applique un courant de décharge de 10C (soit 48A), voit sa tension chuter immédiatement sous l'effet de la résistance série à 3,66V à 40°C, 3,25V à 20°C et 2,11V à 0°C (Cf. Figure II-16). Le fait que la tension de 2,11V soit inférieure à la tension minimale autorisée (2,7V) met en évidence que la température est un facteur très limitant pour l'utilisation finale.

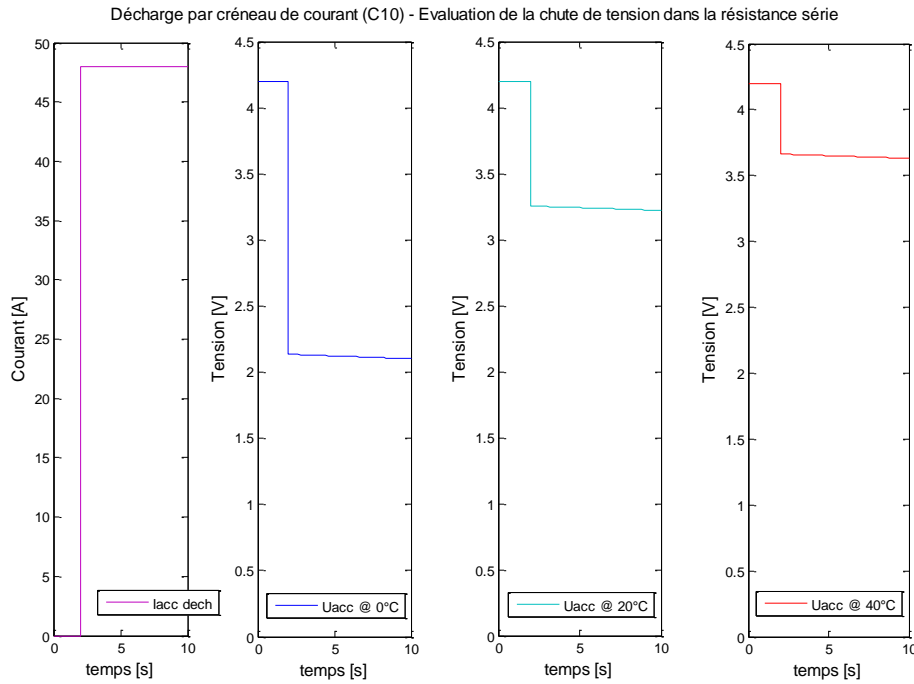


FIGURE II-16 : EVALUATION DE LA CHUTE DE TENSION DANS LA RESISTANCE SERIE POUR UNE DECHARGE A 10C

En outre, on note que l'évolution de la résistance en fonction de l'état de charge est relativement linéaire sur une plage entre 15 et 100%, voire même constant à hautes températures. Ceci peut expliquer pourquoi l'évolution de la résistance série en fonction de l'état de charge n'est pas toujours prise en compte dans les modèles d'accumulateur. Cependant, la résistance augmente fortement à faible état de charge et, à moins que l'application finale ne garantisse un fonctionnement sur une plage haute d'état de charge, il est souhaitable de tenir compte de l'évolution de R_{acc} en fonction de SOC .

Comme pour l'évolution de la tension à vide en fonction de l'état de charge, la caractéristique « Résistance vs. Etat de charge » peut être modélisée par une équation mathématique, de type exponentielle ou logarithmique. Par exemple, on exprime l'évolution de la résistance série (en $m\Omega$) en fonction de l'état de charge à 0°C par la relation II-4 et à 20°C par la relation II-5. La comparaison de ces modèles avec les relevés expérimentaux est réalisée en Figure II-17. Cependant, on peut difficilement associer une équation mathématique à la caractéristique à 40°C, que ce soit une expression de la forme II-6 ou II-7. De fait, il peut être préférable de recourir à une modélisation par table de données, dans laquelle on saisit les grandeurs mesurées : résistance, état de charge, température. Cette table définit alors une surface (cf. Figure II-18) correspondant à la valeur de la résistance série à différents états de charge (compris entre 0% et 100%) et à différentes températures (comprises entre 0°C et 40°C), les valeurs non mesurées étant interpolées à partir de celles relevées en essai.

$$R_{acc}(0^{\circ}C) = -18,9 \cdot \ln(SOC) + 41 \quad \text{II-4}$$

$$R_{acc}(20^{\circ}C) = -7,7 \cdot \ln(SOC) + 18 \quad \text{II-5}$$

$$R_{acc} = a \cdot \ln(SOC) + b \quad \text{II-6}$$

$$R_{acc} = c \cdot SOC^d \quad \text{II-7}$$

L'ensemble des résultats de ces caractérisations sont donnés en Annexe 3 (cf. Tableau VII-1, Tableau VII-2 et Tableau VII-3). On peut également exploiter ces essais pour appréhender les phénomènes transitoires dans un accumulateur ; cette analyse complémentaire est proposée dans le paragraphe suivant.

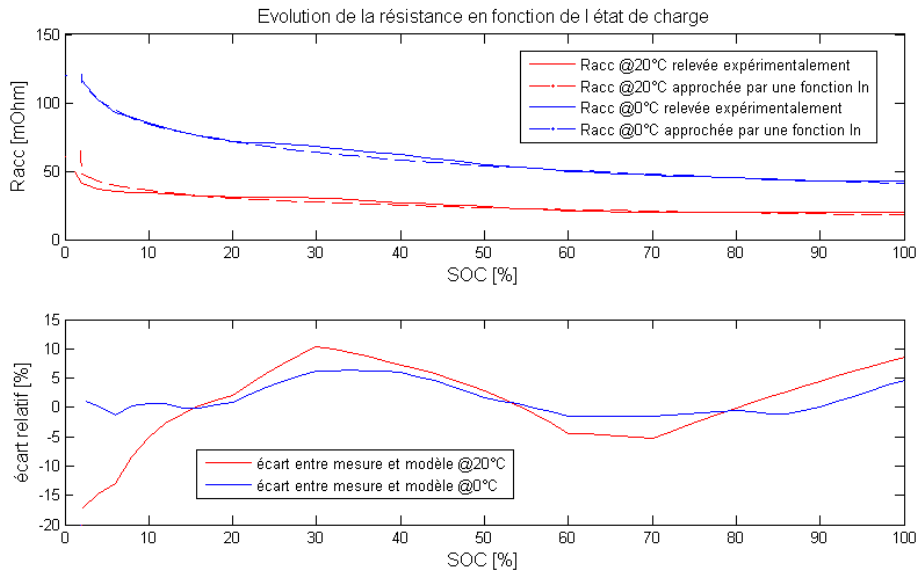


FIGURE II-17 : MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA RESISTANCE EN FONCTION DE L'ETAT DE CHARGE

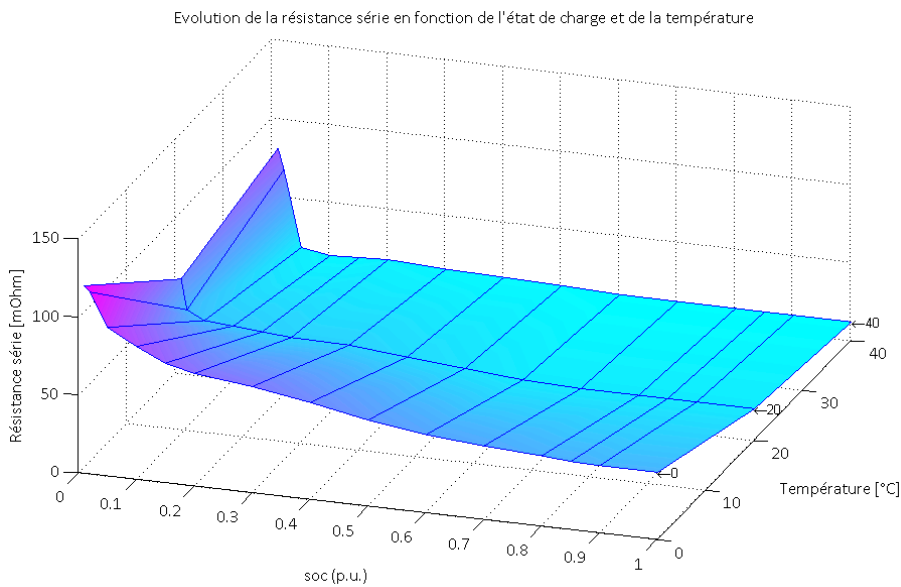


FIGURE II-18 : EVOLUTION DE RACC EN FONCTION DE SOC ET DE T (LOOK-UP TABLE DANS MATLAB)

3.4.2 ANALYSE COMPLEMENTAIRE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

En complément du paragraphe précédent, dans lequel les paramètres du modèle quasi-statique sont été identifiés, on propose d'exploiter ces résultats expérimentaux pour analyser les paramètres identifiés et plus spécifiquement la résistance série R_{acc} . Comme expliqué au paragraphe II.3.3, la résistance R_{acc} est déterminée par le rapport de la différence entre la tension en fin de décharge U_{acc} et la tension à vide relevée après une période de stabilisation $E_0(i)$, par le courant de décharge I_{acc_dech} , selon la relation II-8.

$$R_{acc} = \frac{E_0(i) - U_{acc}}{I_{acc_dech}} \quad \text{II-8}$$

La décharge est effectuée à courant constant, comme présentée en Figure II-19, entre la tension à vide $E_0(i-1)$ et la tension U_{acc} , la tension $E_0(i)$ étant relevée après une période d'équilibre, c'est-à-dire lorsque sa variation est inférieure à 0,1%.

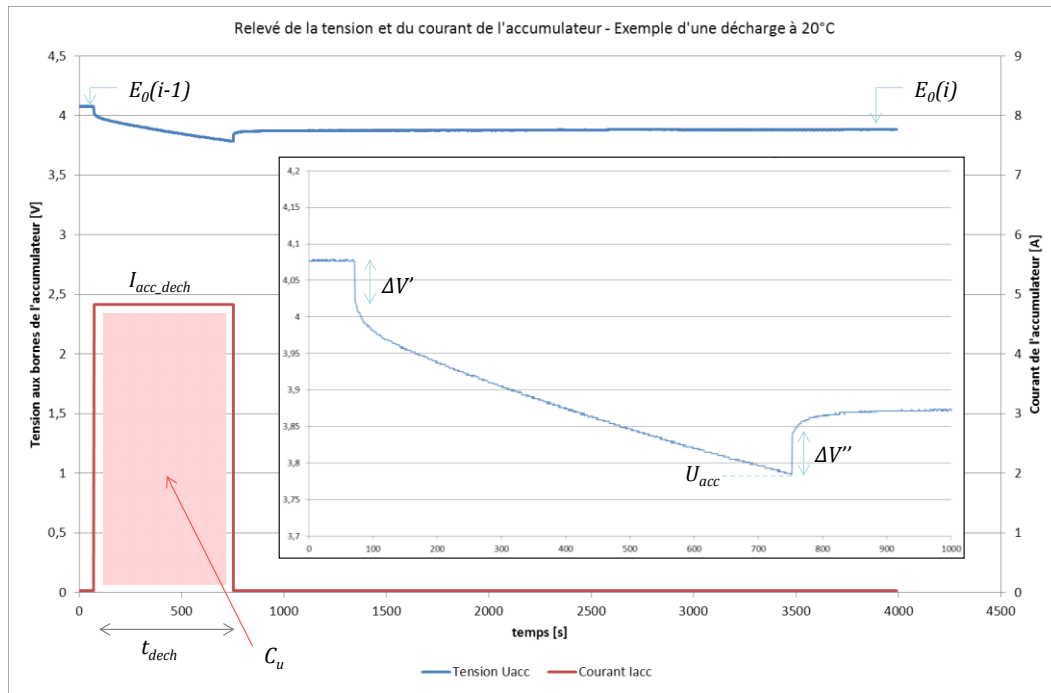


FIGURE II-19 : DECHARGE D’UN ACCUMULATEUR PAR UN CRENEAU DE COURANT A 20°C

Sur les relevés de la tension aux bornes de l’accumulateur, on observe que la phase transitoire se déroule en deux temps : une première étape très rapide due à l’effet d’une résistance ohmique pure et une seconde étape plus lente liée aux phénomènes plus basses fréquences. On propose de déterminer les résistances associées aux évolutions rapides de tension : soit R' liée à la chute de tension $\Delta V'$ observée lors de l’application du courant de décharge au circuit (Cf. équation II-9) et R'' liée à la chute de tension $\Delta V''$ observée lors de l’annulation du courant de décharge (Cf. équation II-10).

$$R' = \frac{\Delta V'}{I_{acc_dech}} \tag{II-9}$$

$$R'' = \frac{\Delta V''}{I_{acc_dech}} \tag{II-10}$$

Le Tableau II-3 donne les valeurs de résistance déterminées à différents états de charge, à 20°C. Par exemple, pour un état de charge de 91%, ces résistances sont de l’ordre de 11mΩ et sont inférieures à la résistance R_{acc} dont la valeur est 19,7mΩ. La résistance R_{acc} , telle que déterminée, comprend une résistance représentative des phénomènes basses fréquences. On détermine alors une résistance R_{eq_d} selon la relation II-11.

$$R_{eq_d} = R_{acc} - R'' \tag{II-11}$$

Cette résistance R_{eq_d} renseigne sur l’influence des phénomènes « basses fréquences » sur la valeur de la résistance interne de l’accumulateur.

| palier | | $i = 1$ | $i = 2$ | $i = 3$ | $i = 4$ | $i = 5$ | $i = 6$ | $i = 7$ |
|-------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $SOC(i-1)$ | [%] | 100 | 91 | 70 | 31 | 14 | 6 | 4 |
| $SOC(i)$ | [%] | 91 | 70 | 31 | 14 | 6 | 4 | 2 |
| R_{acc} | [mΩ] | 19,7 | 19,7 | 30,5 | 32,5 | 35,4 | 41 | 60,3 |
| R' | [mΩ] | 10,6 | 11,0 | 11,6 | 12,6 | 17,8 | 20,7 | 23,8 |
| R'' | [mΩ] | 11,0 | 11,2 | 12,2 | 16,3 | 20,3 | 23,8 | 30,8 |
| R_{eq_d} | [mΩ] | 8,7 | 8,5 | 18,3 | 16,2 | 15,1 | 17,2 | 29,4 |

TABLEAU II-3 : EVOLUTION DE LA RESISTANCE SERIE EN FONCTION DE L’ETAT DE CHARGE – DECOMPOSITION DE RACC

On relève que la résistance liée aux phénomènes « basses fréquences » est du même ordre de grandeur que les résistances mesurées à l'ouverture et à la fermeture du circuit. On note également que $R'(i+1)$ est égale à $R''(i)$, ce qui est cohérent car elles sont déterminées au même état de charge.

Cette analyse montre que la résistance série du modèle quasi-statique englobe des grandeurs liées à des impédances de diverses constantes de temps et qu'il est intéressant de dissocier ces impédances comme cela est proposé au paragraphe II.4.

3.4.3 SIMULATION DU MODELE QUASI-STATIQUE

Après avoir identifié les paramètres du modèle à partir des expérimentations, le modèle quasi-statique est implanté puis simulé avec Matlab® Simulink. Ce paragraphe présente le modèle élaboré pour les simulations numériques et les résultats de simulation en comparaison avec les résultats expérimentaux.

Le synoptique du modèle quasi-statique de l'accumulateur Li-ion polymère 4,8Ah est donné en Figure II-20. L'accumulateur étant considéré comme une source de tension, la donnée de sortie principale du modèle est la tension aux bornes de l'accumulateur. Une variation du courant, donnée d'entrée de l'accumulateur, entraîne une réaction de l'accumulateur au niveau de la tension à ses bornes. Le courant est intégré par l'intermédiaire d'un compteur coulométrique afin de déterminer l'état de charge de l'accumulateur. Pour ce faire, le compteur coulométrique doit être initialisé, en renseignant l'état de charge initial de l'accumulateur et sa capacité nominale, selon les résultats obtenus au paragraphe II.2. A partir de l'état de charge, la tension à vide E_0 correspondante est déterminée grâce à la relation établie entre ces deux grandeurs : $E_0 = f_1(SOC)$. De même, on détermine la valeur de la résistance série R_{acc} à partir de l'état de charge et de la température de l'essai, selon la relation $R_{acc} = f_2(SOC, T)$. La tension aux bornes de l'accumulateur est obtenue par l'application de la loi de Kirchhoff au circuit de la Figure II-10 : $U_{acc} = E_0 - R_{acc} \cdot I_{acc}$. La convention utilisée pour ce modèle est la suivante : lorsque le courant est positif, l'accumulateur se décharge ; lorsque le courant est négatif, l'accumulateur se recharge.

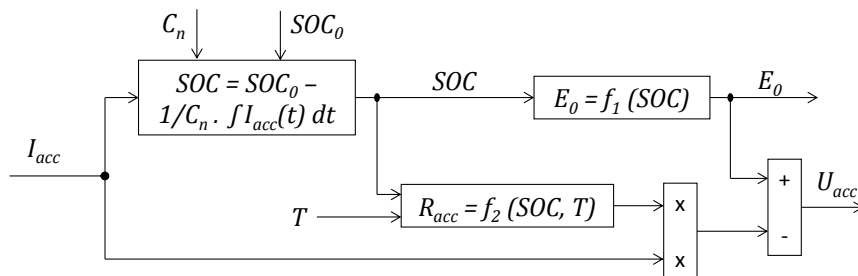


FIGURE II-20 : SYNOPTIQUE DU MODELE QUASI-STATIQUE SOUS MATLAB SIMULINK

Les simulations du modèle sont effectuées avec Matlab® Simulink en appliquant au modèle le courant relevé expérimentalement. On compare alors la réponse du modèle numérique à cette sollicitation en courant avec la tension mesurée aux bornes de l'accumulateur. La Figure II-21 présente le résultat d'une simulation du modèle en réponse à une série de créneaux de courant (constant et égal à 1C) à 20°C. Les résultats aux autres températures sont donnés en Annexe 3 (Figure VII-8 et Figure VII-9). La réponse du modèle suit assez bien le relevé expérimental, ce qui signifie que les paramètres du modèle ont été correctement identifiés. Cependant, une validation du modèle quasi-statique en réponse à une autre sollicitation en courant (issue d'un profil de mission) est nécessaire et sera proposée au chapitre IV.

Si l'on observe plus précisément la tension aux bornes de l'accumulateur relevée expérimentalement et celle obtenue par simulation du modèle (Cf. Figure II-22), on remarque un écart non négligeable dans les phases transitoires et particulièrement lors de la phase de retour à l'équilibre des charges à la suite d'une sollicitation en courant. L'écart entre l'expérimentation et la simulation est au maximum de 0,05V, ce qui représente moins de 2% de la tension. Ce n'est donc pas l'écart en amplitude qui est problématique, mais plutôt que cet écart dure dans le temps. C'est en cela la limite du modèle quasi-statique. Au vu de l'allure de la tension en réponse

à un créneau de courant, on appréhende le fait que le comportement électrique de l'accumulateur en phase transitoire ne peut être modélisé par une simple résistance, et qu'un modèle intégrant une impédance complexe semble plus adapté pour représenter ces phénomènes transitoires.

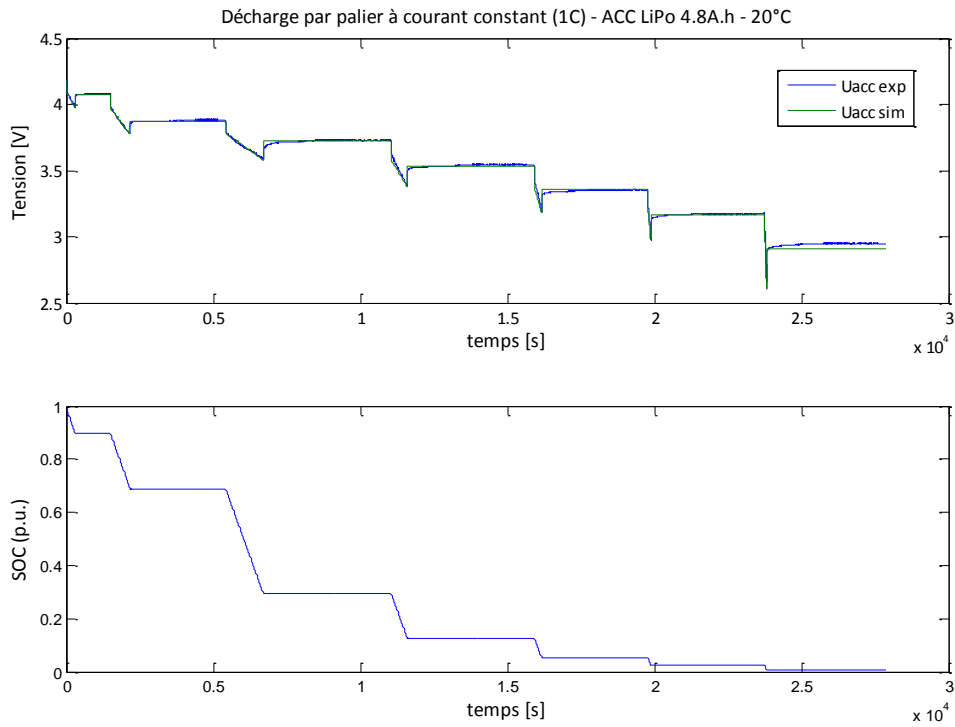


FIGURE II-21 : SIMULATION DU MODELE QUASI-STATIQUE EN COMPARAISON AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX (A 20°C)

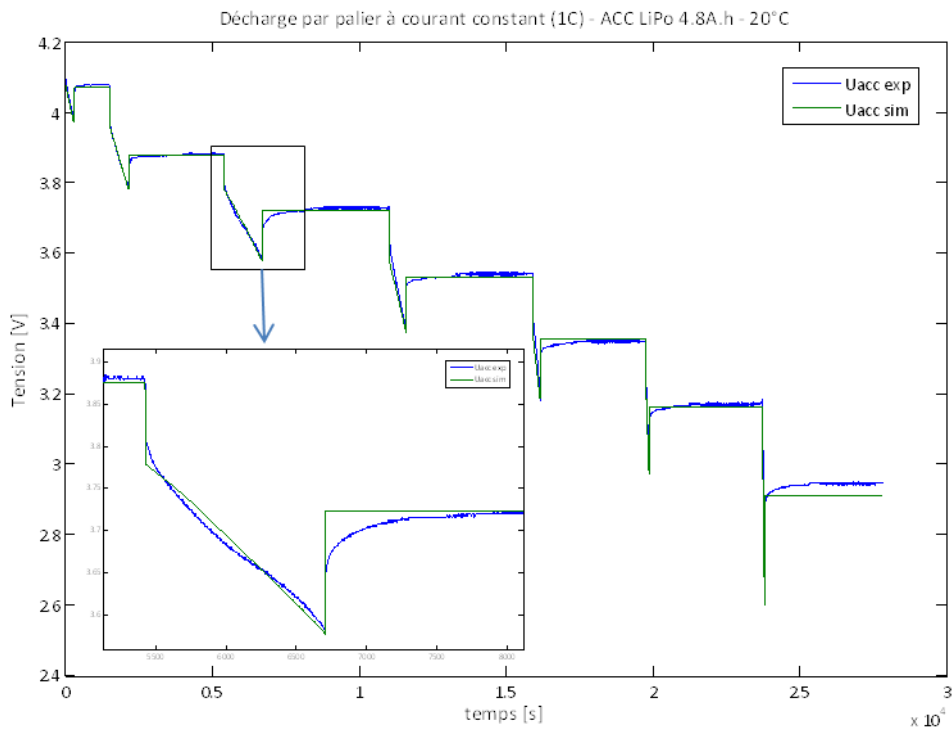


FIGURE II-22 : COMPARAISON DES RESULTATS ISSUS DE LA SIMULATION DU MODELE ET DE L'EXPERIMENTATION (A 20°C)

Globalement, les écarts observés entre les relevés expérimentaux et les résultats de simulation sont du même ordre de grandeurs, quelle que soit la température d'essai. Lors de la simulation du modèle quasi-statique, la chute de tension due à la résistance série est surestimée, en comparaison avec la chute de tension effectivement relevée lors des essais. En effet, on a vu que la résistance du modèle quasi-statique intègre une résistance purement ohmique et une résistance représentative de phénomènes lents. La résistance interne telle qu'elle est définie donne lieu à une surévaluation de la chute de tension dans les phases transitoires et ceci d'autant plus que l'état de charge est faible.

Pour conclure, les caractérisations effectuées sur les cellules d'accumulateur Li-ion polymère 4,8Ah dans différentes conditions expérimentales ont permis d'identifier les paramètres du modèle quasi-statique présenté en début de partie. L'identification des paramètres se fait aisément à partir des relevés de caractérisation par chronopotentiométrie du type décharge par palier de courant. Le modèle établi est un modèle simple qui tient compte de l'évolution des paramètres en fonction de contraintes (état de charge, température). Ce modèle fonctionnel est relativement simple à implanter et ne crée pas de difficulté particulière en simulation. Il renseigne suffisamment sur le comportement en régimes permanent et transitoire pour être implanté dans un modèle de système complet dans l'optique d'en étudier le comportement électrique.

Ce modèle quasi-statique ne représente pas le comportement dynamique de l'accumulateur. Il permet de passer d'un état stable à un autre état stable, sans inclure les phénomènes transitoires. Pour une utilisation du type analyse de la qualité du réseau, il peut être nécessaire d'affiner le modèle pour tenir compte du comportement dynamique du composant et notamment du phénomène de diffusion des charges. C'est la raison pour laquelle un modèle dynamique est développé dans la partie suivante.

4 CARACTERISATION POUR LA DETERMINATION DU MODELE DYNAMIQUE

Cette partie est consacrée à la caractérisation des accumulateurs en vue d'identifier les paramètres d'un modèle dynamique. Ce modèle comportemental est présenté dans le premier paragraphe. Dans un deuxième temps le protocole de test associé à ce modèle et les hypothèses de travail sont détaillés. Ensuite, la méthode d'identification des paramètres est décrite à partir d'une analyse harmonique. Enfin, le dernier paragraphe concerne les résultats des expérimentations et des simulations du modèle.

4.1 PRESENTATION DU MODELE DYNAMIQUE

Le modèle dynamique est un modèle par circuit électrique équivalent composé d'une f.e.m. et d'une impédance complexe. Ce modèle dynamique est issu du modèle de Randles qui représente les phénomènes de constantes de temps différentes se produisant dans un accumulateur. Le modèle de Randles est reconnu comme étant le modèle fondamental électrochimique de l'interface Electrode/Electrolyte [27], [57].

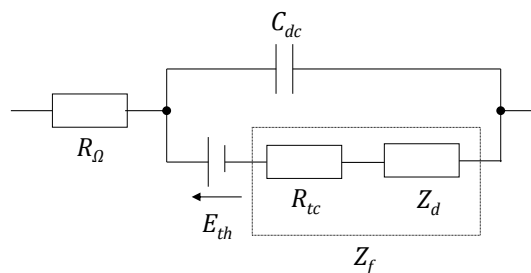


FIGURE II-23 : MODELE FONDAMENTAL ELECTROCHIMIQUE DE L'INTERFACE ELECTRODE/ELECTROLYTE

Le modèle de Randles est composé de :

E_{th} : tension d'équilibre de la réaction d'oxydoréduction [V]

R_{Ω} : résistance ohmique [Ω] représentant la chute de tension dans l'électrolyte (le déplacement des espèces dans l'électrolyte étant lié à sa conductivité) et dans les électrodes (connectique comprise). Elle est appelée également résistance HF (Hautes Fréquences).

C_{dc} : capacité de double couche [F]

Il existe à l'interface électrode/électrolyte une double couche électrochimique⁹ ou double couche de Helmholtz qui se comporte comme un condensateur électrique [58].

R_{tc} : résistance de transfert de charge [Ω]

Le transfert de charge caractérise la cinétique de la réaction électrochimique en fonction de la tension d'électrode.

Z_f : impédance faradique [Ω]

L'impédance faradique représente les phénomènes de transfert de charges à l'interface électrode/électrolyte et de transport de matière dans les électrodes et dans l'électrolyte.

Z_d : impédance de diffusion [Ω]

Dans un accumulateur électrochimique, les espèces peuvent se déplacer par migration électrique, diffusion chimique ou convection mécanique ou thermique dans l'électrolyte ou dans les électrodes [58]. La migration électrique est un déplacement d'espèces chargées créé par un gradient de potentiel électrique. La diffusion chimique est un déplacement d'espèces chargées ou non sous l'effet d'un gradient de potentiel chimique. La convection mécanique ou thermique est un transport d'espèces créé par le déplacement naturel ou forcé du milieu. De manière générale, on néglige les phénomènes de convection et de migration [27].

Pour faciliter la détermination des paramètres du modèle et particulièrement de l'impédance complexe, le modèle de Randles peut être représenté comme en Figure II-24, dans la mesure où la caractérisation est réalisée autour d'un point d'équilibre en tension.

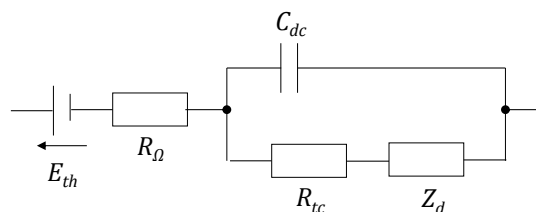


FIGURE II-24 : MODELE DE RANDES

De plus, la constante de temps associée au phénomène de transfert de charge étant inférieure à celle des phénomènes de diffusion [59], le modèle de Randles peut être adapté en mettant la capacité de double couche en parallèle de la résistance de transfert de charge (cf. Figure II-25).

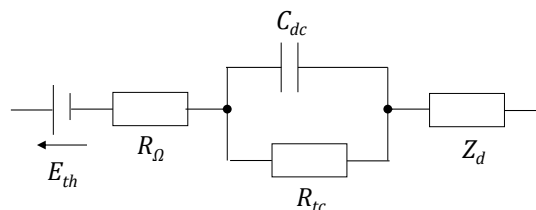


FIGURE II-25 : MODELE DE RANDES SIMPLIFIE

⁹ L'application d'un champ électrique à l'interface électrode/électrolyte induit un excès de charges positives d'un côté de l'interface et de charges négatives de l'autre côté. Les porteurs de charge sont généralement les électrons dans l'électrode et les ions dans l'électrolyte. Lorsque le potentiel évolue, la répartition des charges de part et d'autre de l'interface varie, induisant un courant capacitif [27].

Le modèle comportemental d'accumulateur retenu est issu du modèle de Randles, auquel on ajoute en série une inductance L_{fl} (en Henry) pour représenter le comportement inductif du composant à hautes fréquences.

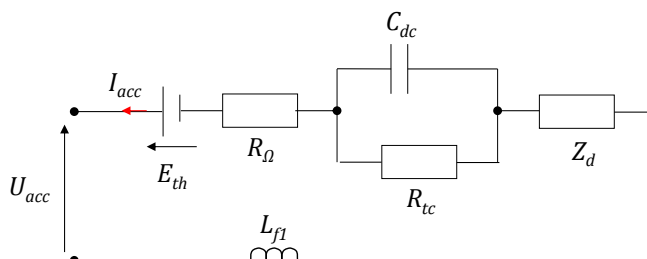


FIGURE II-26 : MODELE DYNAMIQUE D'UN ACCUMULATEUR

4.2 PROCEDURE DE CARACTERISATION

La caractérisation de l'accumulateur est effectuée par spectrométrie d'impédance, qui permet d'étudier le comportement de l'accumulateur à différentes fréquences. La Spectrométrie d'Impédance Electrochimique (SIE) consiste à appliquer à l'accumulateur un signal modulé de pulsation ω [rad.s⁻¹] et à mesurer le module et le déphasage du signal de sortie en réponse à la sollicitation en entrée.

Deux modes de fonctionnement sont possibles pour le spectromètre : mode galvanostat et mode potentiostat. En mode galvanométrique, un courant sinusoïdal avec ou sans composante continue est appliqué à l'accumulateur. L'amplitude de ce signal sinusoïdal est constante et faible devant celle de la composante continue, lorsque celle-ci n'est pas nulle. Sa fréquence est variable pour balayer une plage de fréquence définie au préalable. La tension mesurée aux bornes de l'accumulateur, en réponse à la sollicitation en courant, permet de déterminer l'impédance du système (module et phase ou partie réelle et partie imaginaire). Cette méthode est utilisée sur des dispositifs pour lesquels le point de fonctionnement ne varie pas ou peu en réponse à la sollicitation en courant. Ce peut être le cas pour des batteries d'accumulateurs à des points de fonctionnement particuliers (exclus les forts et les faibles états de charge où la tension évolue plus rapidement). Dans certains cas, l'hypothèse d'invariance dans le temps ne peut être garantie car l'accumulateur se charge ou se décharge. Cela nécessite alors de restreindre la plage de fréquence (pour réduire la durée de réalisation du spectre) ou d'introduire une compensation en courant [27].

En mode potentiométrique, on applique à l'accumulateur une tension sinusoïdale autour d'une tension de polarisation maintenue constante et le relevé du courant en réponse à la sollicitation en tension permet de déterminer l'impédance de l'accumulateur (Cf. Figure II-27). L'amplitude du signal est faible et sa fréquence est variable. Cette méthode est couramment utilisée dans les études d'électrochimie [27], [60]. Cependant, selon [60], les phénomènes observés à l'équilibre par cette méthode sont différents de ceux observés lors d'une charge ou d'une décharge de l'accumulateur. Néanmoins, une spectrométrie d'impédance doit être effectuée sur un Système Linéaire Invariant dans le Temps (SLIT) et le mode potentiométrique le permet, contrairement au mode galvanométrique pour les accumulateurs à caractériser dans notre cas.

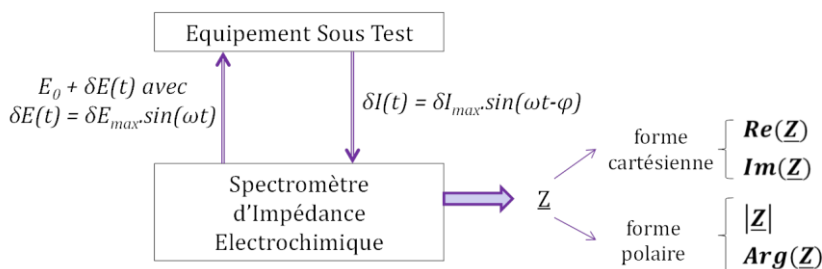


FIGURE II-27 : PRINCIPE DE LA SPECTROMETRIE D'IMPEDANCE EN MODE POTENTIOMETRIQUE

Pour cette étude, l'accumulateur est testé en mode potentiométrique de manière à ce que le composant se situe autour d'un point d'équilibre (afin d'éviter sa charge ou sa décharge). Les essais sont effectués autour de plusieurs points de fonctionnement (*i.e.* plusieurs tensions à vide) correspondant à des états de charge différents. L'amplitude de la tension sinusoïdale superposée à la tension de polarisation est adaptée en fonction de la valeur de la résistance série de l'accumulateur. Généralement elle est inférieure à 10mV pour que la mesure soit effectuée dans des conditions linéaires [60]. Pour ces essais, l'amplitude maximum de la tension sinusoïdale est fixée à 5mV, afin de garantir que le courant induit par cette sollicitation en tension soit inférieur à dix pour cent du courant nominal.

La gamme de fréquence balayée au cours de l'essai est choisie en fonction des phénomènes que l'on cherche à observer (par exemple, la plage de fréquence peut être étendue jusqu'au milli-Hertz de façon à observer les phénomènes « lents » tels que le transport des espèces par diffusion ou par convection), et aussi en fonction de l'application du modèle. Dans notre cas, les spectrométries sont effectuées sur une plage de fréquence comprise entre 20mHz et 5 ou 10kHz. La limite basse en fréquence, en lien avec l'Application, est fixée par la stratégie de gestion d'énergie dans la poutre complète. En effet, cette stratégie développée à partir de l'étude des profils de mission d'un aéronef prévoit pour l'accumulateur une sollicitation régulière et limitée en termes de réponse dynamique, et le maintien de son état de charge autour d'un certain niveau. Ce qui signifie que le temps de repos de l'accumulateur (c'est-à-dire hors période de décharge ou de recharge) est court à l'échelle de la mission et est de l'ordre de la dizaine de secondes. Une caractérisation en fréquence à partir de 100mHz est donc suffisante au regard de l'application. Néanmoins, lors des essais, la borne minimale de la plage de fréquence a été abaissée pour observer intégralement le phénomène de diffusion, qui dans certaines conditions de tension et de température n'est pas observable au-dessus de 100mHz. En ce qui concerne la borne supérieure de la plage de fréquence, il s'agit également de déterminer la limite la plus significative entre celle dictée par l'application et celle permettant l'observation des phénomènes caractéristiques de l'accumulateur. Dans la poutre électrique, l'accumulateur est associé à un convertisseur statique dont la fréquence de découpage est de l'ordre de 20kHz. Il est intéressant de connaître le comportement de l'accumulateur à ce niveau de fréquence. Cependant, lors des essais, on observe un comportement inductif du composant pour des fréquences de quelques kilo-Hertz. Il n'est donc pas opportun de réaliser la spectrométrie jusqu'à 20kHz où l'inductance du câblage risque d'être prépondérante par rapport à l'inductance du composant.

Après avoir déterminé la plage de fréquence à balayer en SIE, il reste à préciser le nombre de points par décade et le nombre de mesures effectuées par période. Pour ces essais, le nombre de points par décade est de 20 au-delà de 66Hz et 6 en dessous de cette fréquence. Les mesures sont réalisées sur 10 périodes, pour toute la plage de fréquence. De ces paramètres va dépendre la durée de la spectrométrie. Leur valeur est issue d'un compromis entre précision de la mesure et durée de l'essai, même si la durée de l'essai influence moins un relevé en mode potentiométrique qu'en mode galvanométrique.

Dans les deux cas, l'impédance complexe est déterminée, soit sous sa forme cartésienne, soit sous sa forme polaire. L'impédance complexe peut être alors représentée dans le plan de Bode (module et phase en fonction de la fréquence) ou dans le plan de Nyquist (partie imaginaire en fonction de la partie réelle).

$$\delta E(t) = \delta E_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad \text{II-12}$$

$$\delta I(t) = \delta I_{max} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{II-13}$$

$$\underline{Z} = \frac{\delta E_{max}}{\delta I_{max}} \cdot e^{j\varphi} \quad \text{II-14}$$

$$\text{Coordonnées polaires – Module : } |\underline{Z}| = \frac{\delta E_{max}}{\delta I_{max}} \text{ et Phase : } \text{Arg}(\underline{Z}) = \varphi \quad \text{II-15}$$

$$\text{Coordonnées cartésiennes – Partie réelle : } \text{Re}(\underline{Z}) = \frac{\delta E_{max}}{\delta I_{max}} \cdot \cos \varphi \quad \text{II-16}$$

$$\text{et Partie imaginaire : } \text{Im}(\underline{Z}) = \frac{\delta E_{max}}{\delta I_{max}} \cdot \sin \varphi$$

Enfin, les essais sont effectués aux températures ambiantes suivantes : 0°C, +20°C et +40°C, selon les préconisations du fournisseur. L'équipement sous test est, préalablement aux spectrométries, maintenu à la température de test pendant une durée suffisante pour atteindre la stabilisation thermique du composant.

4.3 METHODE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE DYNAMIQUE

Les spectres d'impédance obtenus lors des essais sont exploités sous la forme de diagramme de Nyquist¹⁰. La première étape dans l'identification des paramètres du modèle dynamique (Cf. Figure II-26) consiste à interpréter ces relevés dans le plan de Nyquist de manière à associer leur allure aux paramètres du modèle. Pour ce faire, une décomposition du modèle de Randles est proposée dans les paragraphes suivants. Un rappel de la représentation dans le plan de Nyquist des impédances est donné en Annexe 6.

4.3.1 REPRESENTATION DE L'IMPEDANCE DU CIRCUIT $R_{tc} // C_{dc}$

Le circuit est composé de la résistance de transfert de charge en parallèle avec la capacité de double couche.

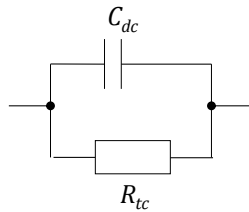


FIGURE II-28 : CIRCUIT $R_{tc} // C_{dc}$

L'expression de l'impédance complexe¹¹ du circuit « $R_{tc} // C_{dc}$ » est la suivante :

$$Z_1(p) = \frac{R_{tc}}{1 + R_{tc} \cdot C_{dc} \cdot p} \quad \text{II-17}$$

La représentation dans le plan de Nyquist du circuit « $R_{tc} // C_{dc}$ » est un demi-cercle (Cf. Figure II-29). L'impédance $Z_1(p)$ est équivalente à la résistance R_{tc} aux basses pulsations, et à celle du condensateur C_{dc} aux hautes pulsations. La pulsation critique [rad.s⁻¹], au sommet du demi-cercle, est la suivante :

$$\omega_{c1} = \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{R_{tc} \cdot C_{dc}} \quad \text{II-18}$$

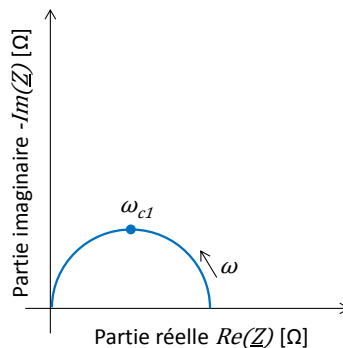


FIGURE II-29 : REPRESENTATION DE L'IMPEDANCE DU CIRCUIT $R_{tc} // C_{dc}$ DANS LE PLAN DE NYQUIST

¹⁰ En électrochimie, il est d'usage de représenter l'opposé de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle et uniquement la partie capacitive.

¹¹ p est l'opérateur de Laplace, $p = j \cdot \omega$

4.3.2 REPRESENTATION DE L'IMPEDANCE DU CIRCUIT $R_{\Omega} + R_{TC} // C_{DC}$

Le circuit est composé de la résistance ohmique (ou résistance HF) en série avec le circuit « $R_{TC} // C_{DC}$ ».

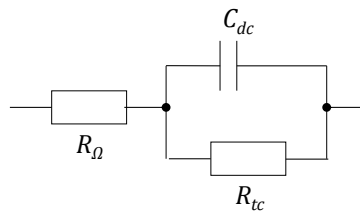


FIGURE II-30 : CIRCUIT $R_{\Omega} + R_{TC} // C_{DC}$

L'expression de l'impédance du circuit « $R_{\Omega} + R_{TC} // C_{DC}$ » est la suivante :

$$Z_2(p) = R_{\Omega} + \frac{R_{tc}}{1 + R_{tc} \cdot C_{dc} \cdot p} \quad \text{II-19}$$

La représentation dans le plan de Nyquist du circuit « $R_{\Omega} + R_{TC} // C_{DC}$ » est le demi-cercle associé au circuit « $R_{TC} // C_{DC}$ » traduit sur l'axe des abscisses (partie réelle) de la valeur de la résistance ohmique (Cf. Figure II-31). L'impédance $Z_2(p)$ est équivalente à la résistance $R_{TC} + R_{\Omega}$ aux basses pulsations, et à résistance R_{Ω} aux hautes pulsations. La pulsation critique, au sommet du demi-cercle, est celle définie par la relation II-18.

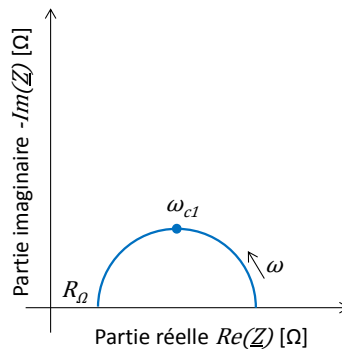


FIGURE II-31 : REPRESENTATION DE L'IMPEDANCE DU CIRCUIT $R_{\Omega} + R_{TC} // C_{DC}$ DANS LE PLAN DE NYQUIST

4.3.3 REPRESENTATION DE L'IMPEDANCE DU CIRCUIT $R_{\Omega} + R_{TC} // C_{DC} + Z_D$

Avant d'évoquer la représentation du circuit « $R_{\Omega} + R_{TC} // C_{DC} + Z_D$ », il est nécessaire de rappeler ce qu'est le phénomène de diffusion et quelles sont les manières de l'appréhender.

Le phénomène de diffusion décrit la consommation ou la production d'espèces à l'interface électrode/électrolyte. La diffusion chimique est le transport d'espèces sous l'effet d'un gradient de potentiel chimique. Trois hypothèses sont habituellement présentées pour définir les conditions limites au phénomène de diffusion [27] :

Diffusion avec distance de diffusion finie (ou hypothèse de diffusion-convection ou convection de Nernst) –

Elle traduit la situation où la diffusion est limitée à une distance fixée, autrement dit au-delà d'une certaine distance de l'interface, la solution électrolytique est uniformément agitée et la concentration de l'espèce est indépendante de la distance à l'interface.

Diffusion dans une couche mince (ou hypothèse de diffusion linéaire restreinte) – Elle traduit la situation où le milieu est imperméable à l'espèce à une certaine distance de l'interface.

Diffusion dans un milieu semi-fini (ou hypothèse de diffusion de Warburg) – Elle traduit une situation où la diffusion n'est pas limitée à une distance fixée.

L'impédance de Randles selon les trois hypothèses de diffusion [27] est représentée dans le plan de Nyquist en Figure II-32. Les expressions mathématiques des impédances suivant ces différentes hypothèses de diffusion sont données dans le paragraphe suivant.

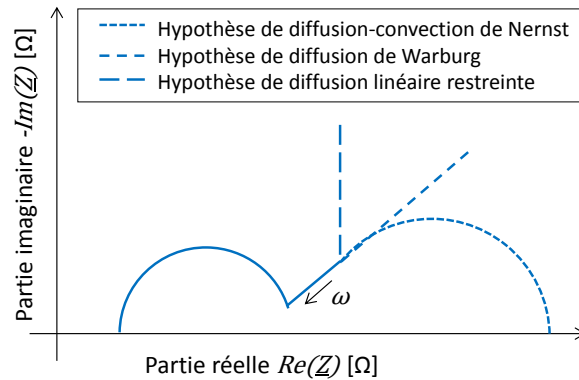


FIGURE II-32 : REPRESENTATION DE L'IMPEDANCE DE RANDLES SELON LES TROIS HYPOTHESES DE DIFFUSION

4.3.4 MODELISATION DU PHENOMENE DE DIFFUSION

Impédance de Warburg

L'impédance de Warburg est un cas particulier d'un CPE (Constant Phase Element). Pour mémoire, un CPE est un composant usuellement employé pour représenter le phénomène de double couche. Son expression est :

$$Z_{CPE}(p) = \frac{1}{Q \cdot p^\gamma} \quad \text{II-20}$$

Avec : Q : coefficient multiplicateur [$\Omega^{-(1-\gamma)} \cdot F^\gamma$]
 γ : ordre de l'impédance, $0 \leq \gamma \leq 1$

Il s'agit d'un élément à phase constante et égale à $-(\gamma \cdot \pi/2)$ rad. Lorsque $\gamma = 1$, le CPE est équivalent à un condensateur idéal de capacité égale à Q . Lorsque $\gamma = 0$, son comportement est purement résistif. Enfin, on note que $Q = 1/|Z_{CPE}|$ lorsque $\omega = 1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

L'impédance de Warburg est un CPE avec $\gamma = 0,5$.

$$Z_W(\omega) = \frac{1}{Q_W \cdot (j\omega)^{1/2}} = \frac{\sigma(1-j)}{\omega^{1/2}} \quad \text{II-21}$$

Avec : σ : paramètre dépendant des phénomènes électrochimiques [$\Omega \cdot \text{s}^{-1/2}$]

La représentation de l'impédance de Warburg dans le plan de Nyquist (Cf. Figure II-32) est une droite de pente 1. Dans un plan de Bode, son module est une droite de pente $1/2$ et sa phase est constante et égale à $-\pi/4$ rad.

Impédance de diffusion linéaire restreinte

L'impédance de diffusion restreinte intervient dans les réactions où le transport de matière d'une espèce s'effectue par diffusion dans une couche mince dont une des parois est imperméable à cette espèce [58]. Elle s'exprime comme suit :

$$Z_M(p) = R_d \cdot \frac{\coth(\tau_d p)^{1/2}}{(\tau_d p)^{1/2}} \quad \text{II-22}$$

Avec : R_d : facteur d'échelle [Ω]
 τ_d : constante de temps [s]

Cette impédance a un comportement capacitif en basses fréquences et est équivalente à une impédance de Warburg en hautes fréquences (Cf. Figure II-32).

Impédance de Nernst (diffusion-convection)

L'impédance de diffusion-convection intervient dans les réactions où le transport de matière d'une espèce s'effectue par diffusion et convection dans une phase volumique [58]. Selon l'approximation de Nernst, son expression est la suivante :

$$Z_{W\delta}(p) = R_d \cdot \frac{\tanh(\tau_d p)^{1/2}}{(\tau_d p)^{1/2}} \quad \text{II-23}$$

Avec : R_d : facteur d'échelle [Ω]
 τ_d : constante de temps [s]

Cette impédance forme un arc de cercle dans le plan de Nyquist en basses fréquences et est équivalente à l'impédance de Warburg en hautes fréquences (Cf. Figure II-32).

Ces trois impédances ont un comportement différent à basses fréquences, mais à plus hautes fréquences elles sont équivalentes à l'impédance de Warburg. Autrement dit, sur une plage de fréquence intermédiaire, entre les basses fréquences et les fréquences associées au phénomène de transfert de charge, les conditions limites propres à chaque hypothèse n'interviennent pas. L'impédance dans la zone d'indiscernabilité correspond à l'impédance de Warburg [27].

La fréquence à partir de laquelle les impédances divergent est relativement faible (< 1mHz selon [27]). Pour l'application, elle est bien en-deçà de la limite basse. L'hypothèse de diffusion à retenir importe peu puisque, pour les basses fréquences correspondant à cette application, ces hypothèses sont convergentes. L'impédance de Nernst est retenue car son expression en tangente hyperbolique permet mathématiquement de lui substituer une somme finie d'impédances. En effet, cette dernière peut être approchée par deux structures d'impédances : la structure de Foster et la structure de Cauer [61].

Structure de Foster

La structure de Foster (Cf. Figure II-33) découle du théorème de Mittag-Leffler selon lequel toute fraction rationnelle complexe peut être décomposée en une somme d'éléments du premier ordre [61]. Son expression est la suivante :

$$Z_{Foster}(p) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{1 + R_n \cdot C_n \cdot p} \quad \text{II-24}$$

Avec : $R_{Foster_n} = \frac{2R_d}{(n\pi - \pi/2)^2}$ et $C_{Foster_n} = \frac{\tau_d}{2R_d}$ d'où $\tau_{Foster_n} = \frac{\tau_d}{(n\pi - \pi/2)^2}$

Structure de Cauer

La structure de Cauer (Cf. Figure II-34) est obtenue à partir de l'approximation de Padé et du développement en série de Laurent de la fonction tangente hyperbolique [61]. Elle s'exprime comme suit :

$$Z_{Cauer}(p) = \frac{1}{\frac{1}{C_1 \cdot p} + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{\frac{1}{C_2 \cdot p} + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{\dots}}}}} \quad \text{II-25}$$

Avec : $R_{Cauer_n} = \frac{R_d}{(4n-3)}$ et $C_{Cauer_n} = \frac{\tau_d}{R_d(4n-1)}$ d'où $\tau_{Cauer_n} = \frac{\tau_d}{(4n-1)(4n-3)}$

Ces deux structures ont été éprouvées et donnent des résultats similaires [61]. Pour les modèles à venir, la structure de Foster avec un nombre fini d'éléments est retenue.

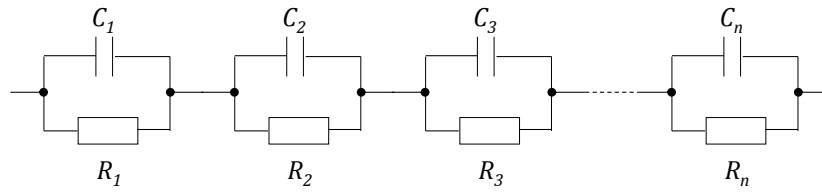


FIGURE II-33 : STRUCTURE DE FOSTER

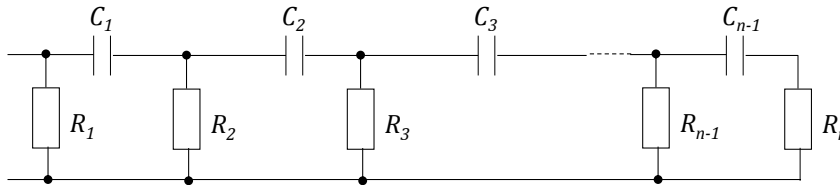


FIGURE II-34 : STRUCTURE DE CAUER

4.3.5 IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE DYNAMIQUE

Les paramètres à identifier sont relatifs au modèle dynamique suivant :

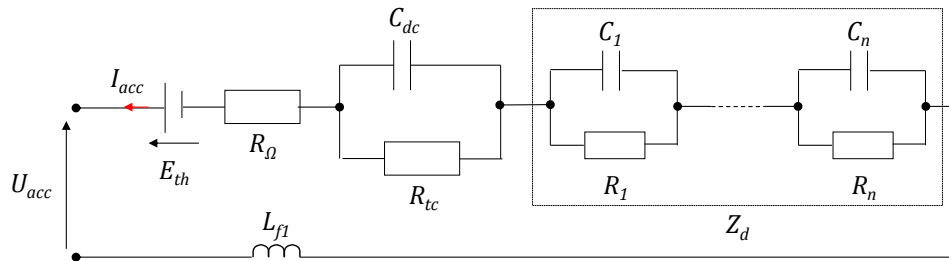


FIGURE II-35 : MODELE DYNAMIQUE AVEC UNE IMPEDANCE DE DIFFUSION SELON LA STRUCTURE DE FOSTER

La spectrométrie d'impédance étant effectuée en mode potentiométrique, la tension à vide est connue et son évolution en fonction de l'état de charge est donnée au paragraphe II.3.4.1. L'identification des autres paramètres est menée à partir d'une analyse fréquentielle des spectres d'impédances. Il s'agit de faire tendre les parties réelle et imaginaire du modèle vers celles relevées expérimentalement. La minimisation de l'écart entre modèle et mesures est réalisée en appliquant la méthode des moindres carrés [59].

$$Ecart = \sum_{\omega} \left[\left(Re(\underline{Z}_{exp}) - Re(\underline{Z}_{mod}) \right)^2 + \left(Im(\underline{Z}_{exp}) - Im(\underline{Z}_{mod}) \right)^2 \right] \quad II-26$$

Avec : \underline{Z}_{exp} : impédance complexe mesurée par SIE
 \underline{Z}_{mod} : impédance complexe du modèle
 Ecart : critère à minimiser

Pour faciliter l'identification des paramètres, la plage de fréquence est scindée en deux : une plage des hautes fréquences pour identifier la résistance ohmique, la capacité de double couche en parallèle de la résistance de transfert de charge ; une plage des basses fréquences pour identifier l'impédance de diffusion. En outre, l'analyse graphique présentée dans les paragraphes précédents permet de vérifier que les paramètres identifiés sont corrects *a posteriori*, ou peut être mise à profit pour initialiser le processus d'identification *a priori*. Dans cette étude, l'étude graphique des spectres sert à initialiser les paramètres à hautes et moyennes

fréquences. En effet, on peut facilement identifier sur les relevés les valeurs de résistance ohmique et résistance de transfert de charge, ainsi que la constante de temps associée au phénomène de transfert de charge. Comme indiqué en Figure II-31, la résistance ohmique R_{Ω} est identifiée à l'intersection de l'arc avec l'axe des réels en hautes fréquences. L'intersection de l'arc avec l'axe des ordonnées en basses fréquences donne la somme des résistances ohmique et de transfert de charge $R_{tc} + R_{\Omega}$. La pulsation critique est déterminée par rapport à la pulsation au sommet de l'arc. La capacité de double couche est alors obtenue à partir de l'expression II-18. En ce qui concerne le phénomène de diffusion, les spectrométries n'ont pas été menées à des fréquences suffisamment basses pour déterminer graphiquement la constante de temps ou la résistance de diffusion. Dans ce cas, on exploite les résultats des essais de charge/décharge à courant constant, à partir desquels on détermine l'ordre de grandeurs des caractéristiques du phénomène de diffusion, comme par exemple la constante de temps ou une estimation de la résistance $R_{eq,d}$ (Cf. paragraphe II.3.4.2).

4.4 RESULTATS DE LA CARACTERISATION ET MODELISATION

Dans le paragraphe suivant, sont présentés dans un premier temps les relevés expérimentaux, puis les résultats issus de l'identification des paramètres et enfin une comparaison des résultats issus de l'expérimentation et de la simulation du modèle sous Matlab® Simulink.

4.4.1 CARACTERISATION EXPERIMENTALE ET IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE

Dans ce paragraphe, sont présentés les relevés expérimentaux sous forme de diagrammes de Nyquist. L'évolution des parties réelle et imaginaire en fonction de la fréquence est également proposée pour mettre en exergue certains aspects du comportement fréquentiel de l'accumulateur.

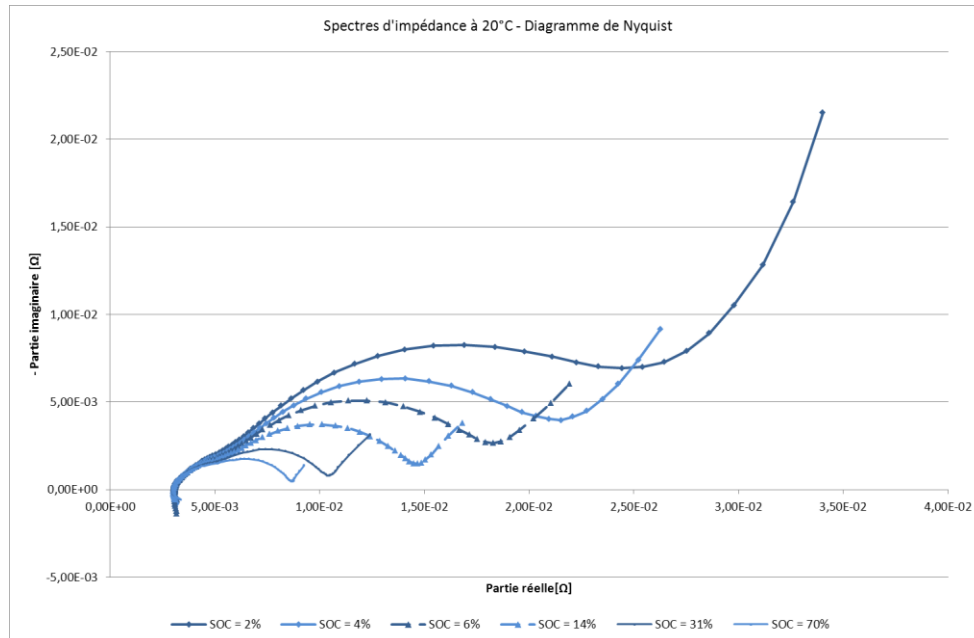


FIGURE II-36 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST A 20°C A DIFFERENTS ETATS DE CHARGE

Les spectres d'impédance dans le plan de Nyquist (Cf. Figure II-36) donnent des renseignements sur l'évolution de l'impédance en fonction de l'état de charge de l'accumulateur, à la température de 20°C. Les spectres relevés aux températures de 0°C et 40°C sont présentés en Annexe 3.

Sur la partie réelle en fonction de la fréquence (Cf. Figure II-37), on note que la résistance ne dépend plus de l'état de charge au-delà d'une certaine fréquence (10Hz à 20°C).

Le relevé de la partie imaginaire en fonction de la fréquence (Cf. Figure II-38) fait apparaître la fréquence $f_{0,acc}$ à partir de laquelle l'accumulateur a un comportement inductif. Cette fréquence $f_{0,acc}$ est comprise entre 1 et 3kHz, suivant la température et l'état de charge. A 20°C, l'inductance L_{fl} est de l'ordre de 10nH.

Ces relevés montrent que l'impédance de l'accumulateur est faible et dépend peu de son état de charge à hautes fréquences et que l'accumulateur est de plus en plus impédant avec la diminution de l'état de charge à basses fréquences.

Les paramètres du modèle dynamique issus de l'identification sont listés dans le tableau qui suit :

| SOC | R_{Ω} | R_{tc} | C_{dc} | R_d | τ_d |
|-----|--------------|----------------|----------|--------------|----------|
| [%] | [Ω] | [Ω] | [F] | [Ω] | [s] |
| 70 | 3.10^{-3} | $5,6.10^{-3}$ | 1,40 | 15.10^{-3} | 120 |
| 30 | 3.10^{-3} | $7,5.10^{-3}$ | 2,33 | 20.10^{-3} | 140 |
| 13 | 3.10^{-3} | $11,6.10^{-3}$ | 3,68 | 25.10^{-3} | 175 |

TABLEAU II-4 : RESULTATS DE L'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE DYNAMIQUE A 20°C

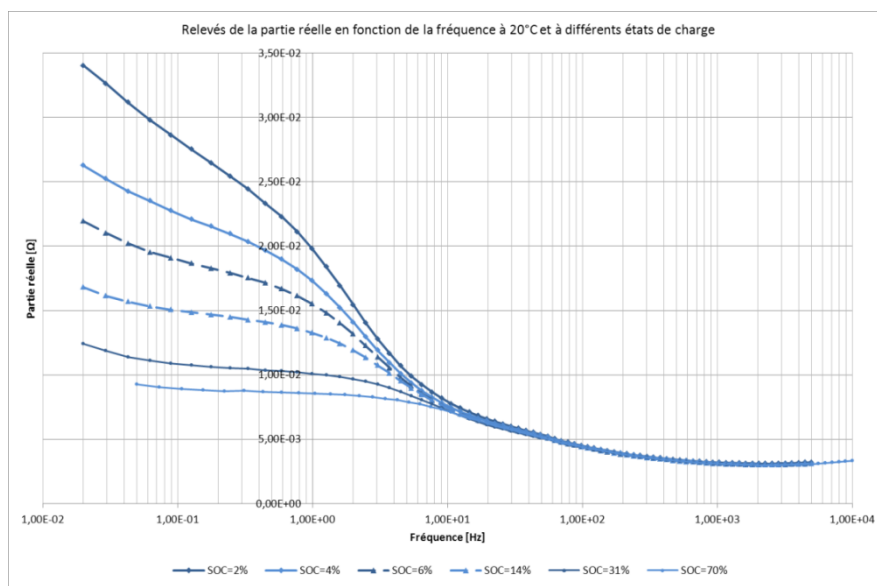


FIGURE II-37 : RELEVES DE LA PARTIE REELLE EN FONCTION DE LA FREQUENCE A 20°C ET A DIFFERENTS ETATS DE CHARGE

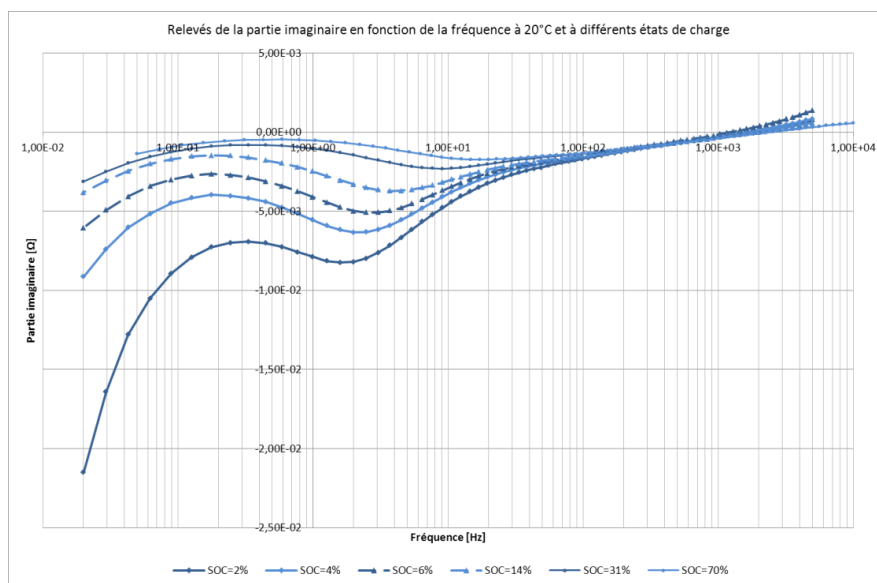


FIGURE II-38 : RELEVES DE LA PARTIE IMAGINAIRE EN FONCTION DE LA FREQUENCE A 20°C ET A DIFFERENTS ETATS DE CHARGE

La résistance ohmique est constante, quel que soit l'état de charge. Les résistances représentant les phénomènes de transfert de charge et de diffusion augmentent lorsque l'état de charge diminue. Les constantes de temps associées aux phénomènes de transfert de charge ou de transport d'espèces sont d'autant plus grandes que l'état de charge est faible.

Après avoir étudié l'influence de l'état de charge sur les paramètres, il est intéressant de voir celle de la température sur ces mêmes paramètres. Sur les spectres en Figure II-39, il apparaît nettement que la température a un impact non négligeable sur l'impédance d'un accumulateur. A un même état de charge, l'impédance d'un accumulateur à 0°C évolue d'un facteur 10 par rapport à son impédance à 40°C.

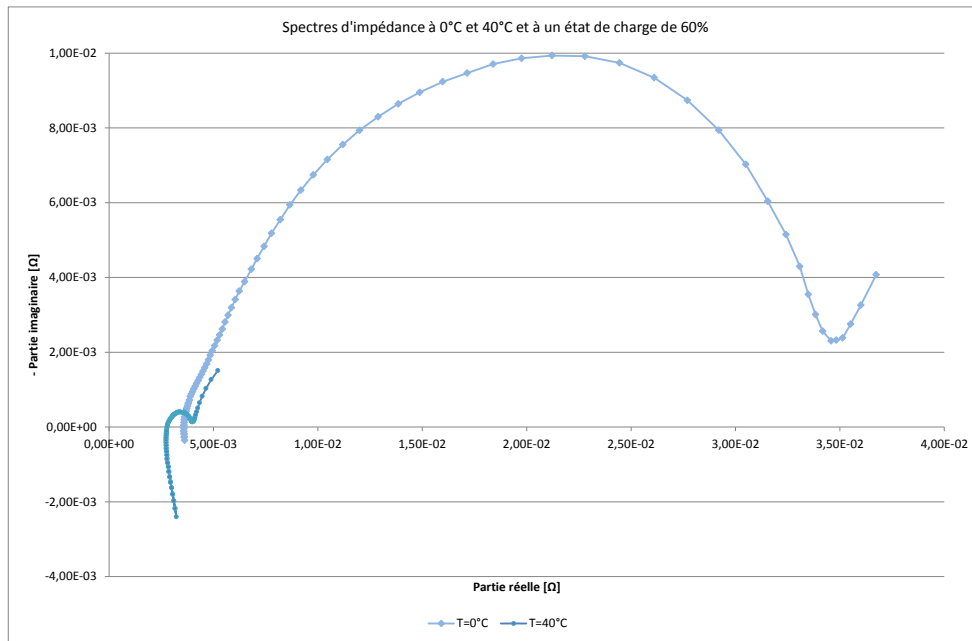


FIGURE II-39 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST – INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

L'impédance est donc très dépendante de la température ambiante et les constantes de temps le sont également. La constante de temps du phénomène de transfert de charge, identifiée par spectrométrie, varie en fonction de l'état de charge de l'accumulateur et de la température.

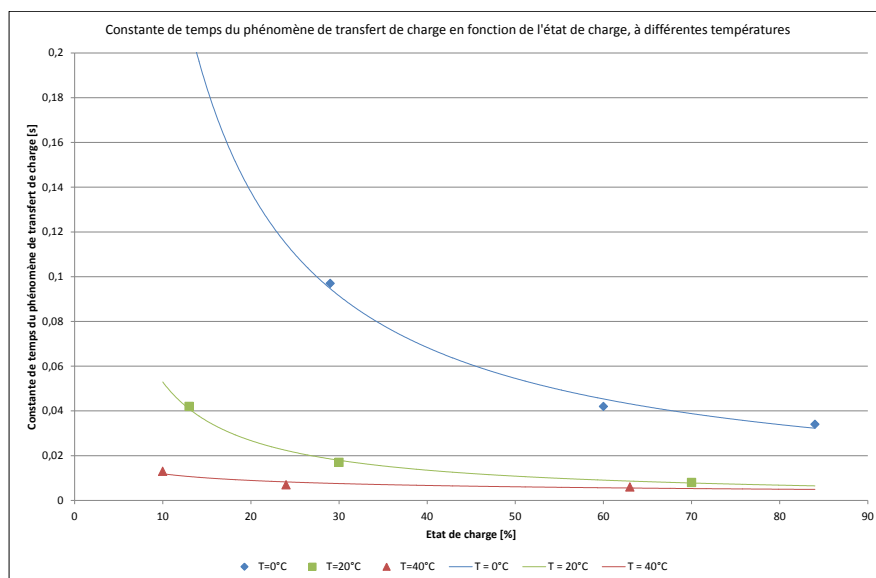


FIGURE II-40 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA CONSTANCE DE TEMPS DU PHENOMENE DE TRANSFERT DE CHARGE

En Figure II-40, on note que le transfert de charge est d'autant plus rapide que la température est élevée et que l'état de charge est proche de 100%. Pour un état de charge de 30% par exemple, la constante de temps à 0°C est dix fois plus grande que la constante de temps à 40°C. Les phénomènes BF sont également impactés par la température. Les essais de charge/décharge à courant constant ont permis d'identifier la constante de temps du phénomène de diffusion. Son évolution est fonction de l'état de charge de l'accumulateur et de la température (Cf. Figure II-41). Pour un état de charge de 30%, la constante de temps de diffusion varie du simple (à 20°C) au double (à 0°C).

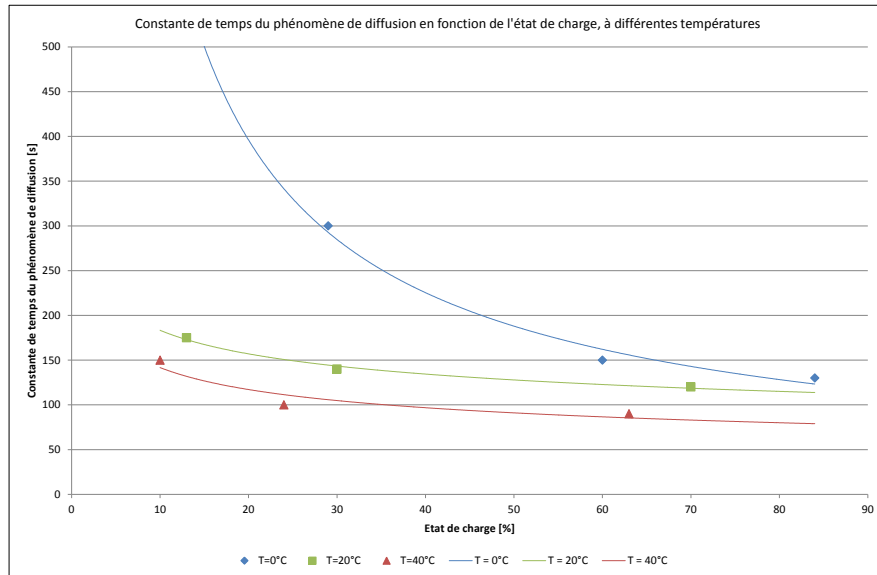


FIGURE II-41 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA CONSTANCE DE TEMPS DU PHENOMENE DE DIFFUSION

4.4.2 SIMULATION DU MODELE DYNAMIQUE

Après l'identification des paramètres du modèle dynamique, une comparaison des spectres issus de la SIE avec ceux du modèle obtenus par simulation sous Matlab® est proposée dans ce paragraphe.

La Figure II-42 présente les résultats expérimentaux à 20°C et pour trois états de charge et les résultats de la simulation du modèle dynamique (Cf. Figure II-35) dont les paramètres sont donnés dans le Tableau II-4.

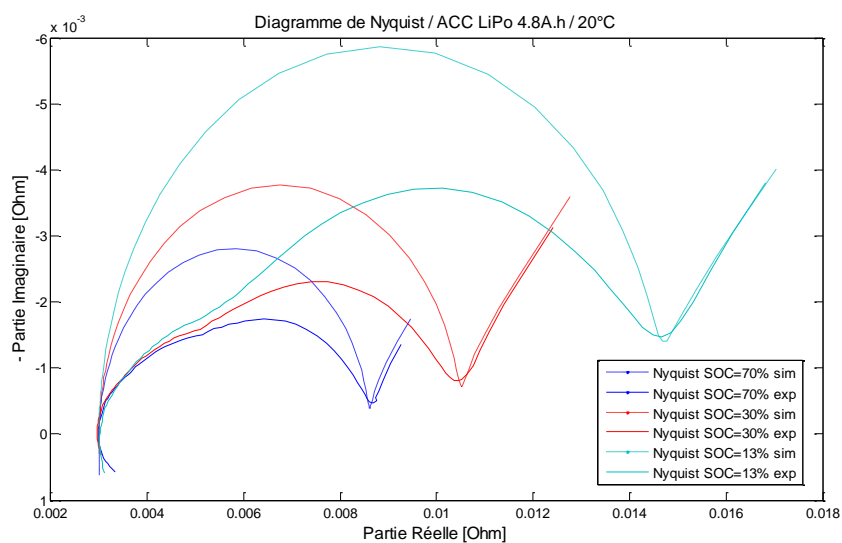


FIGURE II-42 : SPECTRES D'IMPEDANCE A 20°C – COMPARAISON ENTRE EXPERIMENTATION ET SIMULATION DU MODELE DYNAMIQUE

Analyse de la modélisation du phénomène de transfert de charge et de double couche - On remarque sur les spectres de la Figure II-42, que le circuit « R_{tc}/C_{dc} » ne représente pas fidèlement le phénomène de transfert de charge et de double couche électrique. L'écart maximal entre le modèle et la mesure est de 50% sur la partie imaginaire, ce qui est très important. Pour faire tendre le modèle vers les mesures, il est envisageable de remplacer la capacité de double couche par un CPE [62], auquel cas le coefficient Q_{dc} est défini de sorte que les pulsations critiques des circuits « R_{tc}/C_{dc} » et « R_{tc}/CPE » soient identiques :

$$\omega_{c1} = \frac{1}{R_{tc} \cdot C_{dc}} = \left(\frac{1}{R_{tc} \cdot Q_{dc}} \right)^{1/\gamma_{dc}} \quad \text{II-27}$$

$$Q_{dc} = R_{tc}^{(\gamma_{dc}-1)} \cdot C_{dc}^{\gamma_{dc}} \quad \text{II-28}$$

Avec : Q_{dc} : le coefficient multiplicateur du CPE [$\Omega^{-(1-\gamma_{dc})} \cdot F^{\gamma_{dc}}$]
 γ_{dc} : l'ordre du CPE

Une simulation du modèle dynamique intégrant un CPE à la place de la capacité de double couche a été réalisée avec un CPE d'ordre 0,83. Le résultat de cette simulation est donné en Figure II-43. En effet, c'est avec un CPE d'ordre 0,83 que l'on obtient l'écart moyen le plus faible entre le modèle et la mesure. Dans ce cas, l'écart maximal est de 22% sur la partie imaginaire, ce qui reste relativement élevé, mais il est bien inférieur à l'écart maximal obtenu avec le circuit « R_{tc}/C_{dc} ».

Dans le domaine fréquentiel, le circuit intégrant un CPE permet de modéliser plus fidèlement les phénomènes de double couche et de transfert de charge. Concernant les simulations dans le domaine temporel, l'intégration d'une impédance d'ordre non entier telle qu'un CPE est difficile. Dans ce cas, le modèle simulé comprend la capacité de double couche [27].

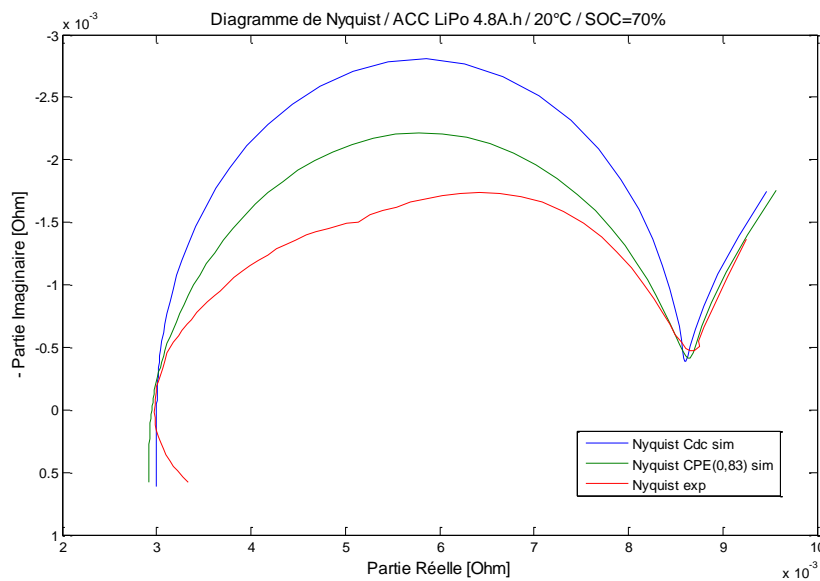


FIGURE II-43 : SPECTRES D'IMPEDANCE A 20°C – COMPARAISON ENTRE LES MODELES AVEC C_{dc} ET AVEC CPE

Analyse de la modélisation du phénomène de diffusion – L'impédance de diffusion a été modélisée par une somme de circuits R-C, selon la structure de Foster. L'étude de l'influence du nombre de circuits est réalisée par simulation et est synthétisée en Figure II-44. On constate que plus le nombre de circuits R-C est élevé, plus le modèle tend vers le relevé expérimental. Cependant, on cherche à déterminer le nombre de circuits nécessaire à une bonne précision du modèle et suffisant dans l'optique d'une implantation aisée du modèle. Pour obtenir un écart inférieur à 5%, il est nécessaire de disposer d'au moins 3 circuits R-C. Avec un circuit ($n=1$), l'écart est

de l'ordre de 30% et avec deux circuits ($n=2$), l'écart est de 6%. Dans un souci d'implantation du modèle, le nombre de circuits est donc limité à 3, ce qui paraît être un compromis acceptable.

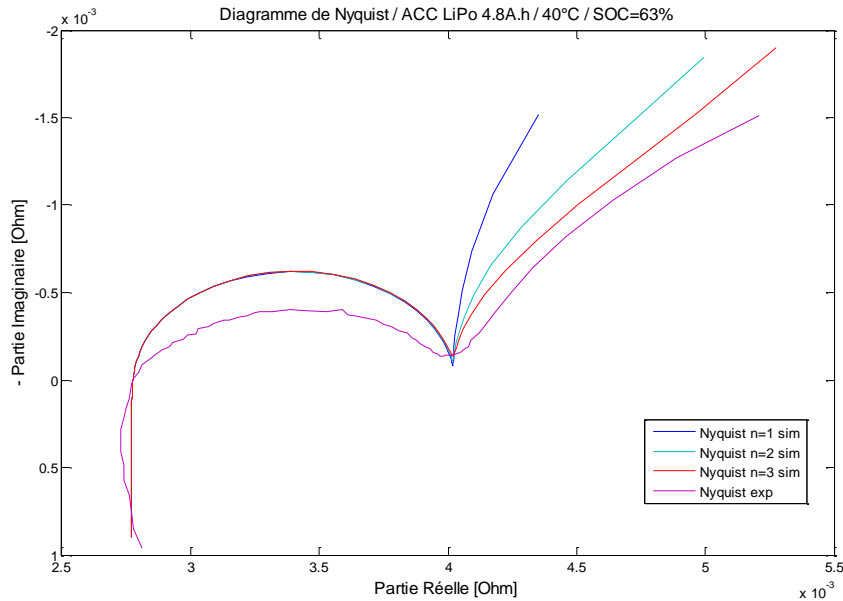


FIGURE II-44 : SPECTRES D'IMPEDANCE A 40°C – INFLUENCE DU NOMBRE DE CIRCUITS R-C DANS LA STRUCTURE DE FOSTER

Enfin, le modèle dynamique est simulé dans le domaine temporel pour évaluer son comportement. Le modèle dynamique tel qu'il est implanté dans Matlab® Simulink est représenté en Figure II-45. On y retrouve le compteur coulométrique pour la détermination de l'état de charge SOC à partir duquel est déduite la tension à vide $E_0 = f_1(SOC)$, la résistance ohmique $R_\Omega = f_2(T)$, la résistance de transfert de charge $R_{tc} = f_3(T, SOC)$ en parallèle de la capacité de double couche $C_{dc} = f_4(T, SOC)$ et les trois circuits R//C représentant le phénomène de diffusion (on comprend ici la nécessité de limiter le nombre de circuits R-C) : $R_1 = f_5(T, SOC)$, $R_2 = f_7(T, SOC)$, $R_3 = f_8(T, SOC)$ et $C_1 = C_2 = C_3 = f_6(T, SOC)$.

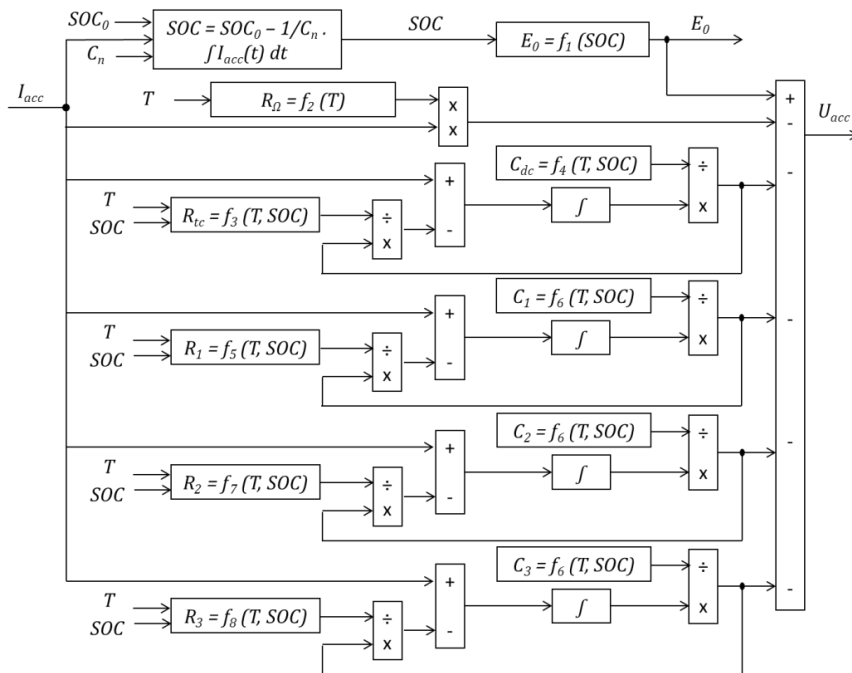


FIGURE II-45 : SYNOPTIQUE DU MODELE DYNAMIQUE SOUS MATLAB SIMULINK

Une simulation du modèle dynamique est proposée en Figure II-46. Il s'agit d'observer la réponse du modèle à une sollicitation du type décharge par palier de courant, en comparaison avec la réponse du modèle quasi-statique et l'expérimentation à la température de 20°C.

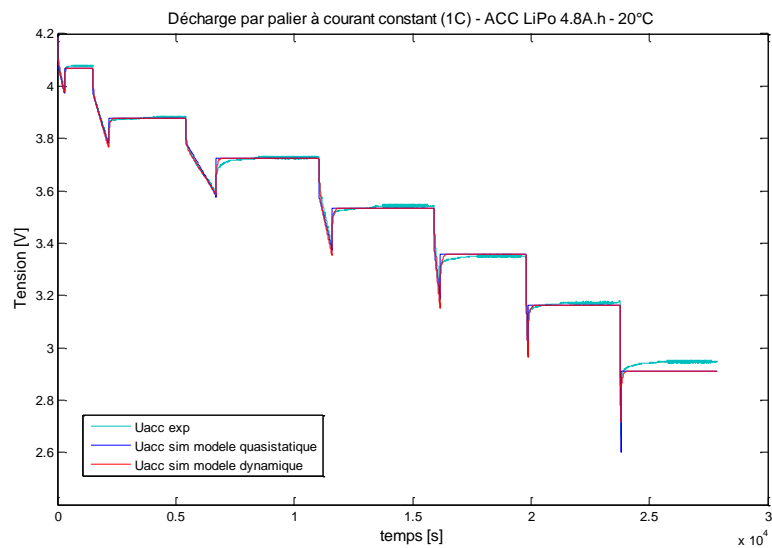


FIGURE II-46 : SIMULATION DES MODELES QUASI-STATIQUE ET DYNAMIQUE EN COMPARAISON AVEC L'EXPERIMENTATION

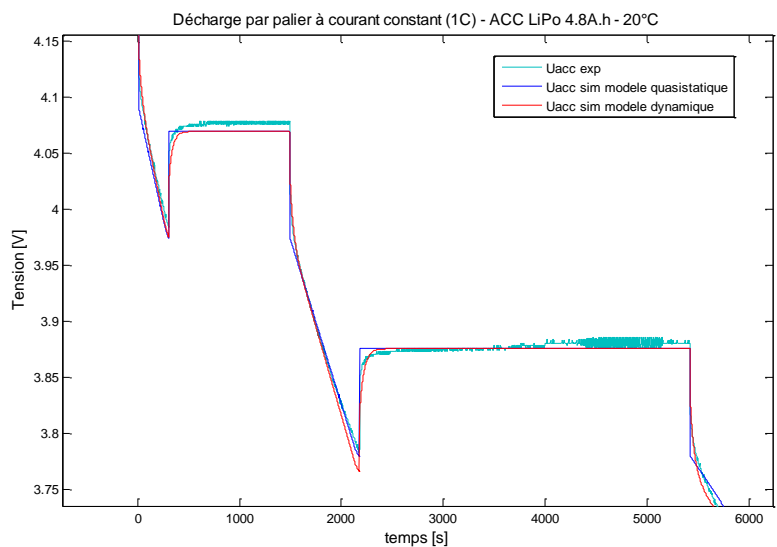


FIGURE II-47 : SIMULATION DES MODELES QUASI-STATIQUE ET DYNAMIQUE EN COMPARAISON AVEC L'EXPERIMENTATION (ZOOM)

Sur la Figure II-47 (zoom sur les 6000 premières secondes de la Figure II-46), on peut voir la différence de comportement entre le modèle quasi-statique, dont l'impédance est purement résistive, et le modèle dynamique pour lequel l'impédance complexe représente distinctement les trois phénomènes caractéristiques d'un accumulateur. L'écart entre chacun de ces modèles et le relevé expérimental est tracé en fonction du temps en Figure II-48. Dans les phases transitoires du créneau de courant, on note que l'écart entre le modèle dynamique et la mesure est inférieur à l'écart entre le modèle quasi-statique et la mesure. L'écart est inférieur à 2% pour le modèle dynamique contre 5% pour le modèle quasi-statique. Ces constatations effectuées pour la température de 20°C sont valables également aux autres températures.

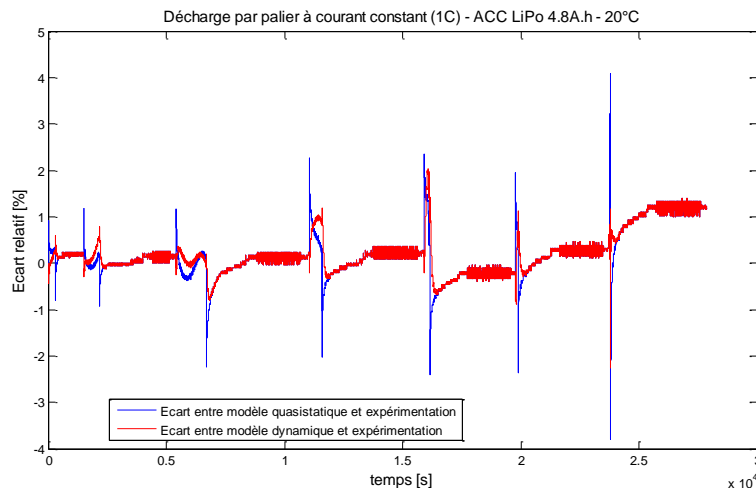


FIGURE II-48 : ECART ENTRE LES MODELES QUASI-STATIQUE ET DYNAMIQUE ET L'EXPERIMENTATION

Pour conclure sur le modèle dynamique, les spectrométries effectuées sur les cellules d'accumulateur Li-ion polymère 4,8Ah à différents états de charge et à plusieurs températures ont permis d'identifier les paramètres du modèle, par une analyse fréquentielle. Le modèle dynamique intègre une impédance complexe qui peut être approchée par une série finie de circuits R-C, dans l'optique de faciliter l'implantation de ce modèle et de simuler son fonctionnement dans le domaine temporel.

5 CONCLUSION SUR LES CARACTERISATIONS ET MODELISATIONS DES ACCUMULATEURS

Ce chapitre II était consacré à la caractérisation et à la modélisation d'accumulateurs électrochimiques de technologie Lithium-ion polymère.

En premier lieu, une mesure de la capacité de stockage des accumulateurs a été proposée. Pour ce faire, une procédure d'essai a été décrite conformément aux préconisations du constructeur, de manière à pouvoir confronter les résultats. La détermination de la capacité était un préalable à l'étude menée par la suite, qui a consisté en la caractérisation des accumulateurs en vue d'en établir deux modèles.

Un premier modèle, quasi-statique, a été développé. Basé sur le modèle de Thévenin, ce modèle simple a été amélioré dans le sens où ses paramètres sont exprimés en fonction de contraintes physiques telles que l'état de charge et la température. Les paramètres de ce modèle fonctionnel sont facilement identifiables à partir d'essais du type décharge par paliers de courant. L'inconvénient du modèle quasi-statique est son manque de précision dans la représentation des phénomènes transitoires lors de l'application d'un courant de charge ou de décharge à l'accumulateur.

Un modèle comportemental a donc été élaboré pour prendre en compte ces aspects dynamiques. Il s'agit d'un modèle issu du modèle de Randles, composé d'une tension à vide (fonction de l'état de charge comme établie dans le modèle quasi-statique) et d'une impédance complexe, représentant les phénomènes de transfert de charge, de double couche électrique et de diffusion. L'identification des paramètres de cette impédance est réalisée par une analyse fréquentielle des spectres mesurés. Le modèle obtenu, valide dans le domaine fréquentiel, peut être régi par des relations mathématiques difficilement transposables dans le domaine temporel. Par exemple, le phénomène de double couche électrique peut être modélisé par un CPE pour des raisons de précision dans le domaine fréquentiel. La transformation inverse d'un CPE n'étant pas évidente, il est approché par un condensateur dans le domaine temporel. Quant au phénomène de diffusion, sa modélisation par une impédance de Warburg dans le domaine fréquentiel est réalisée, par approximation, par

une somme finie de circuits R-C dans le domaine temporel. Dans ce cas, le nombre de circuits R-C, trois en l'occurrence, est issu d'un compromis entre la précision du modèle et la facilité de son implantation.

Au cours de cette étude, une comparaison entre les simulations des deux modèles et les relevés expérimentaux a été proposée. Au-delà des résultats propres à chaque modèle, il est intéressant de souligner la complémentarité des essais, à courant fort et à petits signaux. On note particulièrement l'utilisation des essais de décharge à courant fort pour déterminer la constante de temps du phénomène de diffusion nécessaire au modèle dynamique, mais qui n'a pu être identifiée sur les spectres car le balayage en fréquence lors des Spectrométries d'Impédance Electrochimique ne couvrait pas ces très basses fréquences.

Il en est de même pour la détermination de la résistance interne du composant. La mesure par SIE est plus précise car elle permet aisément de distinguer les différentes résistances et impédances qui traduisent le comportement dynamique des accumulateurs. La mesure par SIE peut aider à l'interprétation de la résistance mesurée en décharge à fort courant. En effet, la résistance interne R_{acc} du modèle quasi-statique peut être assimilée à la résistance en hautes fréquences R_{Ω} relevée par SIE, si l'acquisition des mesures est rapide. Elle peut aussi valoir $R_{\Omega} + R_{tc}$ (résistance de transfert de charge) si la période d'échantillonnage du matériel d'acquisition est grande devant la constante de temps des phénomènes observés. Bref, la comparaison des résultats issus des deux méthodes d'essais permet d'affiner les paramètres des deux modèles.

Enfin, cette série de caractérisations a permis d'observer l'influence de la température sur le comportement électrique des accumulateurs. On a pu relever que la température ambiante a un impact notable sur la résistance interne du modèle quasi-statique et sur l'impédance du modèle dynamique. Cela confirme bien que les performances des accumulateurs sont considérablement diminuées à basses températures. Il apparaît donc judicieux d'associer aux accumulateurs des composants qui soient moins sensibles à la température (particulièrement à basse température). C'est le cas *a priori* des supercondensateurs, dont une étude comparable à celle menée sur les accumulateurs (y compris en température) est présentée au chapitre III.

De ces caractérisations, on retiendra également quelques préconisations à respecter pour utiliser les accumulateurs dans une zone de fonctionnement favorable. Ainsi, on évitera, dans la mesure du possible, de décharger les accumulateurs en dessous de 10% d'état de charge à une température supérieure ou égale à 20°C, et en dessous de 50% d'état de charge à 0°C. Ces considérations relatives à la température de fonctionnement et à la profondeur de décharge autorisée seront intégrées dans l'étude de dimensionnement menée au chapitre V.

Pour compléter cette étude, il est essentiel de valider les modèles élaborés dans ce chapitre sur des profils de charge issus de l'Application. La description des profils de charge et la validation des modèles sont présentés dans le chapitre IV.

III. CHAPITRE 3 : CARACTERISATION ET MODELISATION DES SUPERCONDENSATEURS

Ce chapitre concerne la caractérisation et la modélisation des supercondensateurs. Trois modèles sont développés dans cette partie : deux modèles fonctionnels et un modèle comportemental. Le premier est un modèle standard, normalisé et par conséquent utilisé par les fabricants pour la rédaction de leurs spécifications techniques. Le deuxième, issu du modèle de Zubieta & Bonert, représente des phénomènes physiques de différentes constantes de temps. Ce modèle fonctionnel est composé de deux branches R-C dont la première prend en compte notamment la variation de la capacité en fonction de la tension à ses bornes. Le troisième modélise le comportement fréquentiel des composants. Ce modèle dynamique est constitué d'une impédance complexe traduisant les divers phénomènes caractéristiques du comportement d'un supercondensateur. Pour chacun de ces modèles, l'influence de la température sur ses paramètres est étudiée. La modélisation est effectuée à partir de résultats expérimentaux. Plusieurs essais sont réalisés pour mener à bien cette étude : caractérisations par chronopotentiométrie et par spectrométrie d'impédance. Les conditions expérimentales sont choisies de manière à respecter les préconisations des constructeurs d'une part et en cohérence avec l'application finale des composants d'autre part.

1 EQUIPEMENTS DE TEST ET ELEMENTS TESTES

1.1 BANC DE TEST DES SUPERCONDENSATEURS

Le banc de test utilisé pour la caractérisation des supercondensateurs est identique à celui utilisé pour la caractérisation des accumulateurs, présenté au paragraphe II.1.1.

1.2 SUPERCONDENSATEURS TESTES

Dans le Projet, des packs de supercondensateurs sont hybridés aux deux batteries d'accumulateurs : un pack de supercondensateurs (SCAP1) est connecté au bus n°1 (bus1) via un convertisseur DC/DC et un pack de supercondensateurs (SCAP2) est directement connecté au bus n°2 (bus2). Ces packs de supercondensateurs sont composés de plusieurs modules en série et en parallèle, eux-mêmes constitués de plusieurs cellules en série (cf. Figure III-1), de façon à atteindre les performances énergétiques attendues dans le Projet.



FIGURE III-1 : CELLULE DE SUPERCONDENSATEUR (B650F)

Les cellules unitaires sont de capacité 650F pour la source SCAP1 et 3000F pour la source SCAP2. Pour mener une approche complète et comparative, l'étude a été menée sur des cellules capacités 650F, 1200F et 3000F de deux fabricants que sont Batscap et Maxwell.

Nota : pour des raisons de lisibilité, les cellules de supercondensateurs seront dénommées comme suit dans le reste du document :

| | | |
|--------------|---------|---------|
| Capacité [F] | Maxwell | Batscap |
| 3000 | M3000F | B3000F |
| 1200 | M1200F | B1200F |
| 650 | M650F | B650F |

TABLEAU III-1 : CELLULES DE SUPERCONDENSATEURS MAXWELL ET BATSCAP

Leurs caractéristiques fournies par les constructeurs sont données en Annexe 4 et synthétisées dans le Tableau III-2.

| SUPERCONDENSATEURS | | Electrode à base de charbon actif, électrolyte liquide organique (acétonitrile) | | | | | |
|-------------------------------------|------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Technologie | | Batscap | | | Maxwell | | |
| Fabricant | | Batscap | | | Maxwell | | |
| Capacité | [F] | 650 | 1200 | 3000 | 650 | 1200 | 3000 |
| Référence commerciale | | C650F | C1200F | C3000F | BCAP0650 P270 | BCAP1200 P270 | BCAP3000 P270 |
| Tension nominale | [V] | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 |
| ESR DC | [Ω] | 0,90.10 ⁻³ | 0,50.10 ⁻³ | 0,25.10 ⁻³ | 0,80.10 ⁻³ | 0,58.10 ⁻³ | 0,29.10 ⁻³ |
| ESR AC (1kHz) | [Ω] | / | / | / | 0,60.10 ⁻³ | 0,44.10 ⁻³ | 0,24.10 ⁻³ |
| Courant maximal en pic (pendant 1s) | [A] | / | / | / | 875 | 1600 | 4000 |
| Courant maximal en continu | [A] | / | / | / | 105 | 110 | 150 |
| Puissance disponible | [kW.kg ⁻¹] | / | / | / | 5,4 | 5,0 | 5,4 |
| Puissance max. spécifique | [kW.kg ⁻¹] | 21,2 | 23,3 | 25,4 | 15,1 | 13,8 | 13,8 |
| P _{sc max} * | [kW.kg ⁻¹] | 10,1 | 14,0 | 13,3 | 11,4 | 10,5 | 11,4 |
| Energie disponible | [Wh] | / | / | / | 0,658 | 1,215 | 3,038 |
| Energie spécifique | [Wh.kg ⁻¹] | 3,3 | 4,7 | 5,5 | 3,29 | 4,05 | 5,52 |
| Masse | [g] | 200 | 260 | 550 | 200 | 300 | 550 |
| Volume | [L] | 0,14 | 0,21 | 0,45 | 0,211 | 0,294 | 0,475 |
| Dimensions (Longueur x Diamètre) | [mm] | 51,5 x 60,5 | 74 x 60,5 | 104 x 74,5 | 51,5 x 60,4 | 74 x 60,4 | 138 x 60,4 |
| Températures | | | | | | | |
| - d'utilisation | [°C] | [-35;+65] | [-35;+65] | [-35;+65] | [-40 ; +65] | [-40 ; +65] | [-40 ; +65] |
| - de stockage | | [-35;+70] | [-35;+70] | [-35;+70] | [-40 ; +70] | [-40 ; +70] | [-40 ; +70] |

TABLEAU III-2 : SPECIFICATIONS TECHNIQUES DES SUPERCONDENSATEURS (DONNEES CONSTRUCTEURS [63], [12])

(*) La puissance spécifique maximale est calculée selon la relation III-4 pour permettre une comparaison des performances.

Avant de procéder aux caractérisations de ces composants, une analyse des fiches techniques est proposée, spécifiquement sur les critères d'énergie et de puissance.

L'énergie spécifique donnée par les constructeurs est l'énergie stockée dans un supercondensateur, dont la formule est donnée en I-7, ramenée par rapport à sa masse, comme suit :

$$W_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U^2 / 3600 \cdot m_{sc} \quad \text{III-1}$$

Avec : W_{sc} : énergie stockée dans le supercondensateur [Wh.kg⁻¹]

C_{sc} : capacité du supercondensateur [F]

U : tension aux bornes du supercondensateur [V]

m_{sc} : masse du supercondensateur [kg]

Concernant la puissance spécifique maximale, les deux constructeurs appliquent des formules qui leur sont propres, à savoir la relation III-2 pour Maxwell [12] et la relation III-3 pour Batscap [63].

$$P_{sc_max_Maxwell} = \frac{U^2 / (4 \cdot ESR_{AC})}{m_{sc}} \quad \text{III-2}$$

Avec : $P_{sc_max_Maxwell}$: puissance spécifique maximale dans le supercondensateur selon Maxwell [W.kg⁻¹]
 ESR_{AC} : résistance interne du supercondensateur [Ω], obtenue par un essai AC à 1kHz

$$P_{sc_max_Batscap} = \frac{U^2 / (2 \cdot ESR_{DC})}{m_{sc}} \quad \text{III-3}$$

Avec : $P_{sc_max_Batscap}$: puissance spécifique maximale dans le supercondensateur selon Batscap [W.kg⁻¹]
 ESR_{DC} : résistance interne du supercondensateur [Ω], obtenue par un essai DC

Pour comparer les performances des supercondensateurs, il est préférable de le faire sur des critères semblables. Pour ce faire, la relation III-4 semble être plus appropriée. La puissance spécifique maximale est obtenue à partir de la puissance maximale, donnée en I-8 et démontrée au paragraphe V.1.1.1.

$$P_{sc_max}^* = \frac{U^2 / (4 \cdot ESR_{DC})}{m_{sc}} \quad \text{III-4}$$

Avec : $P_{sc_max}^*$: puissance spécifique maximale dans le supercondensateur [W.kg⁻¹]
 ESR_{DC} : résistance interne du supercondensateur [Ω]

Enfin, la puissance spécifique disponible donnée par Maxwell est déterminée selon la relation suivante, issue des fiches techniques du constructeur [12] :

$$P_{sc_d_Maxwell} = \frac{0,12 \cdot U^2 / ESR_{DC}}{m_{sc}} \quad \text{III-5}$$

Avec : $P_{sc_d_Maxwell}$: puissance spécifique disponible dans le supercondensateur selon Maxwell [W.kg⁻¹]
 ESR_{DC} : résistance interne du supercondensateur [Ω]

Cette puissance spécifique donnée par Maxwell correspond à la moitié de la puissance maximale définie par la relation III-4.

$$\frac{P_{sc_d_Maxwell}}{P_{sc_max}^*} = \frac{0,12 \cdot U^2 / ESR_{DC} / m_{sc}}{U^2 / (4 \cdot ESR_{DC}) / m_{sc}} \approx 0,5 \quad \text{III-6}$$

Les fabricants donnent, au travers de leurs fiches techniques, bon nombre d'informations sur leurs composants dont certaines peuvent être discutées et d'autres, comme la capacité et la résistance, peuvent être identifiées et vérifiées par des essais. Il convient donc d'effectuer le même type d'essais que ceux menés par les constructeurs pour établir leurs datasheets.

2 CARACTERISATION POUR LA DETERMINATION DU MODELE STANDARD R-C

Cette partie concerne la caractérisation des supercondensateurs selon une procédure normalisée, en vue d'identifier les paramètres du modèle standard et de les comparer aux données des constructeurs. Après une rapide présentation du modèle, les différents protocoles d'essais définis dans la norme sont décrits. Les procédures retenues pour cette étude sont plus particulièrement détaillées ainsi que la méthodologie d'identification des paramètres à partir des résultats expérimentaux. Les essais de caractérisation sont effectués sur les cellules unitaires de supercondensateurs, dans les conditions expérimentales décrites dans la norme mais également dans d'autres conditions afin d'élargir le domaine de validité du modèle. En fin de partie, les résultats de la simulation du modèle standard sont présentés et comparés aux mesures.

2.1 PRESENTATION DU MODELE STANDARD R-C

Le modèle standard est un modèle simple, dont la définition est donnée dans la norme européenne CEI 62391 [64], relative à l'utilisation des supercondensateurs. Il s'agit d'un modèle par circuit électrique équivalent composé d'une capacité et d'une résistance en série. Ce modèle est couramment utilisé dans le cadre de modélisation fonctionnelle pour l'étude de systèmes énergétiques [48], [65]. Il est également utilisé par les constructeurs pour établir leurs fiches techniques [63], [12]. L'intérêt de ce modèle est donc de valider les données des constructeurs et de comparer les composants en appliquant un essai normalisé. Enfin, le domaine de validité de ce modèle peut être étendu par la prise en compte de l'influence de la température sur les paramètres ESR et C_{SC} .

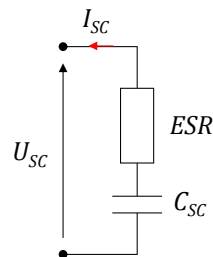


FIGURE III-2 : MODELE STANDARD D'UN SUPERCONDENSATEUR

La convention utilisée pour ce modèle est la convention « générateur ». Le modèle est composé de :

- C_{SC} : capacité du supercondensateur [F]
- ESR : résistance en série (ou Equivalent Serial Resistance) [Ω]

2.2 PROCEDURES DE CARACTERISATION

La norme [64] définit plusieurs protocoles de test pour identifier les caractéristiques du modèle standard. Ces différentes méthodes sont présentées dans les paragraphes suivants et la méthode finalement retenue est plus particulièrement détaillée.

On note également que la norme établit une classification des supercondensateurs en quatre familles et que les essais sont adaptés en fonction de la classe de supercondensateurs. Ainsi, il est nécessaire de situer préalablement cette application par rapport aux quatre classes de la norme, qui sont : sauvegarde de mémoire, stockage d'énergie, puissance et puissance instantanée. Compte-tenu de l'architecture de la poutre et de la stratégie de gestion de l'énergie dans les différentes configurations de la poutre, les supercondensateurs pour le Projet peuvent être répertoriés dans la catégorie « puissance » de la norme.

2.2.1 PROCEDURES POUR LA DETERMINATION DE LA CAPACITE

Dans la norme [64], deux méthodes sont définies pour déterminer la capacité : une méthode dite à courant constant et une méthode dite à charge constante.

Détermination de la capacité par un essai à charge constante – L'Équipement Sous Test (EST), initialement déchargé et en série avec une résistance, est chargé en lui appliquant la tension constante $U_{sc,nom}$. La valeur de la capacité est obtenue à partir de la constante de temps mesurée, en réponse à l'échelon de tension.

Détermination de la capacité par un essai à courant constant – L'EST, initialement déchargé, est chargé en lui appliquant un courant constant $I_{sc,ch}$ jusqu'à ce que la tension à ses bornes atteigne la tension nominale $U_{sc,nom}$. Dès lors, la tension est régulée autour de la tension $U_{sc,nom}$ pendant une durée de 30min. Pendant cette

période, le courant de charge tend vers zéro et les charges s'équilibrent dans le supercondensateur. A l'issue de cette période, l'EST est déchargé par l'application d'un courant constant I_{sc_dech} , jusqu'à atteindre la tension minimale U_{sc_min} admissible par le supercondensateur. La capacité est alors déterminée par rapport à la pente de la tension en fonction du temps.

La méthode retenue pour déterminer la capacité est l'essai à courant constant car il s'agit de l'essai privilégié par les constructeurs [10], [13], [66]. Pour cet essai, le courant de décharge défini dans la norme [64] est fonction de l'utilisation du supercondensateur. Si l'on considère que les supercondensateurs à caractériser répondent à la classification « puissance », alors le courant de décharge à appliquer est déterminé par la relation suivante :

$$I_{sc_dech} = 4 \cdot C_{sc} \cdot U_{sc_nom} \quad \text{III-7}$$

Avec : I_{sc_dech} : courant de décharge du supercondensateur [mA]
 C_{sc} : capacité théorique du supercondensateur [F]
 U_{sc_nom} : tension nominale du supercondensateur [V]

Cependant, ce courant de décharge peut être également celui préconisé par les constructeurs. En outre, dans un cycle galvano-statique, on peut considérer que le courant de charge est égal au courant de décharge en valeur absolue ($|I_{sc_ch}| = |I_{sc_dech}|$). En appliquant la relation III-7 et une marge de 50% compte-tenu des spécifications des fabricants, les courants de charge et de décharge appliqués sont donnés dans le Tableau III-3.

| Capacité | Courant ($ I_{sc_dech} = I_{sc_ch} $) |
|----------|---|
| [F] | [A] |
| 3000 | 50 |
| 1200 | 25 |
| 650 | 15 |

TABLEAU III-3 : COURANT DE CHARGE ET DECHARGE POUR LA DETERMINATION DE LA CAPACITE

Enfin, la température d'essai définie dans la norme [64] est comprise entre 15°C et 35°C. Les constructeurs donnent les caractéristiques de leurs composants à 25°C. Les essais sont donc effectués à 25°C, en cohérence avec la norme et les spécifications des constructeurs. De plus, l'étude est menée à d'autres températures pour observer l'effet de la température sur les paramètres du modèle standard. Ces températures sont comprises dans les limites préconisées par les constructeurs et sont les suivantes : -20°C, -5°C, +10°C, +40°C et +55°C. Dans tous les cas, l'EST est maintenu à la température d'essai pendant une durée suffisante pour atteindre la stabilisation thermique du composant.

2.2.2 PROCEDURES POUR LA DETERMINATION DE LA RESISTANCE SERIE

Deux méthodes sont également proposées dans la norme [64] pour déterminer la résistance interne d'un supercondensateur.

Détermination de la résistance série par un essai à courant alternatif – Un courant alternatif, d'amplitude faible (entre 1mA et 10mA) et de fréquence 1kHz, est appliqué à l'EST. La résistance ESR_{AC} est obtenue par le rapport entre la tension efficace à ses bornes et le courant efficace appliqué.

Détermination de la résistance série par un essai à courant continu – Un courant continu de décharge est appliqué à l'EST, préalablement chargé suivant la procédure de charge définie au paragraphe III.2.2.1. La résistance ESR_{DC} est obtenue à partir de la chute de tension observée dès l'application du courant de décharge.

La méthode retenue pour déterminer la résistance est l'essai à courant continu car cet essai permet de déterminer à la fois la capacité et la résistance série. En outre, l'essai à courant alternatif est en quelque sorte redondant avec un essai du type spectrométrie d'impédance et qui plus est, effectué à la seule fréquence 1kHz, ce qui ne présente pas un grand intérêt.

2.3 METHODE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE STANDARD R-C

Les paramètres du modèle standard sont déterminés à partir de l'évolution de la tension aux bornes du supercondensateur en fonction du temps (Cf. Figure III-3), relevée lors d'un essai de charge/décharge à courant constant.

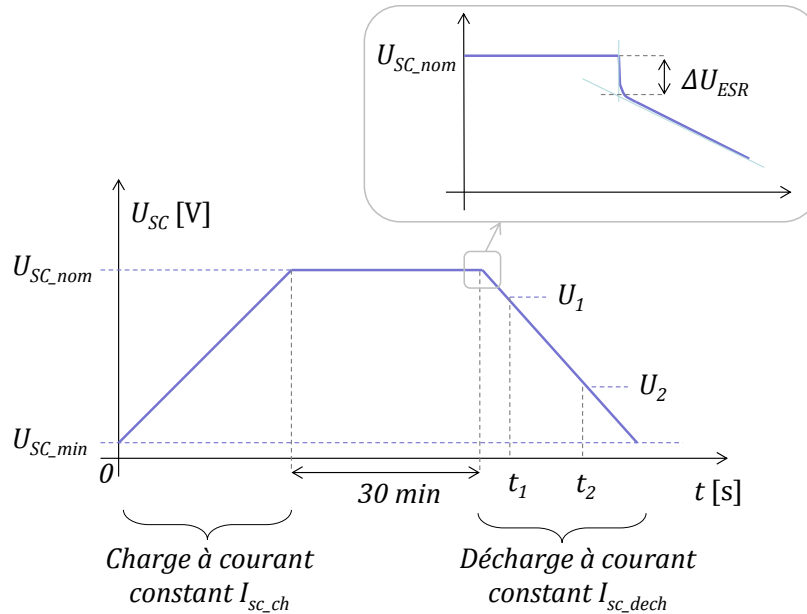


FIGURE III-3 : ALLURE DE LA TENSION AUX BORNES D'UN SUPERCONDENSATEUR LORS D'UNE DECHARGE A COURANT CONSTANT

La capacité du supercondensateur est déterminée à partir de l'évolution de la tension en fonction du temps, qui peut être approchée par une droite à coefficient directeur négatif sur la période de décharge.

$$C_{sc} = I_{sc_dech} \cdot \frac{t_2 - t_1}{U_1 - U_2} \quad \text{III-8}$$

La résistance série est déterminée à partir de la chute de tension observée à l'application du courant de décharge. La chute de tension considérée est la différence entre la tension nominale U_{sc_nom} et la tension lue sur la tangente à la pente décroissante à l'instant où le courant de décharge est appliqué.

$$ESR_{DC} = \frac{\Delta U_{ESR}}{I_{sc_dech}} \quad \text{III-9}$$

2.4 RESULTATS DE LA CARACTERISATION ET MODELISATION

Dans ce paragraphe, sont présentés les relevés expérimentaux et l'identification des paramètres. Un exemple de relevé expérimental est présenté en Figure III-4 et Figure III-5 pour un supercondensateur de 3000F à 25°C. Les relevés pour les autres composants à différentes températures sont donnés en Annexe 5.

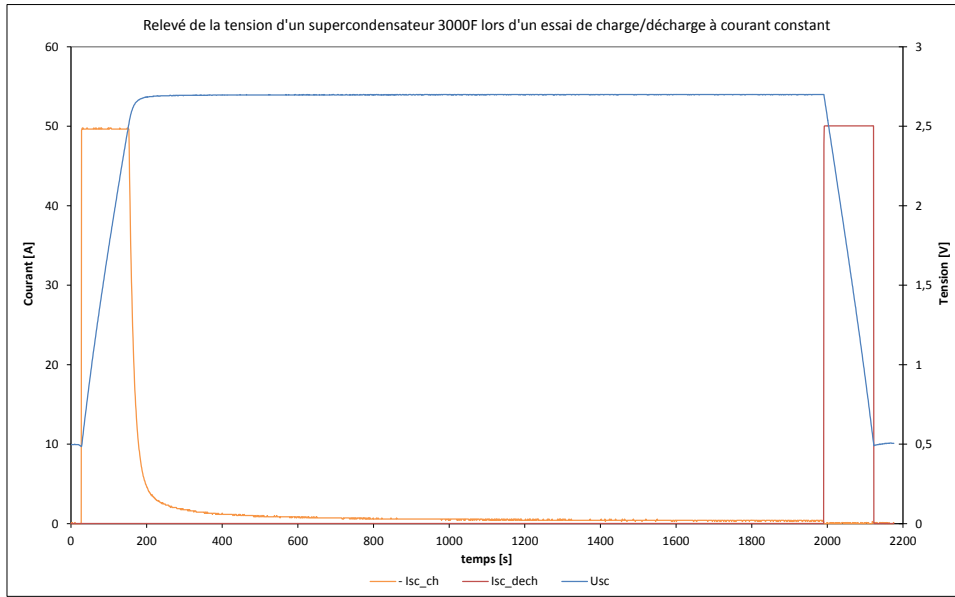


FIGURE III-4 : RELEVÉ DE LA TENSION D'UN SUPERCONDENSATEUR 3000F LORS D'UN ESSAI DE CHARGE / DECHARGE

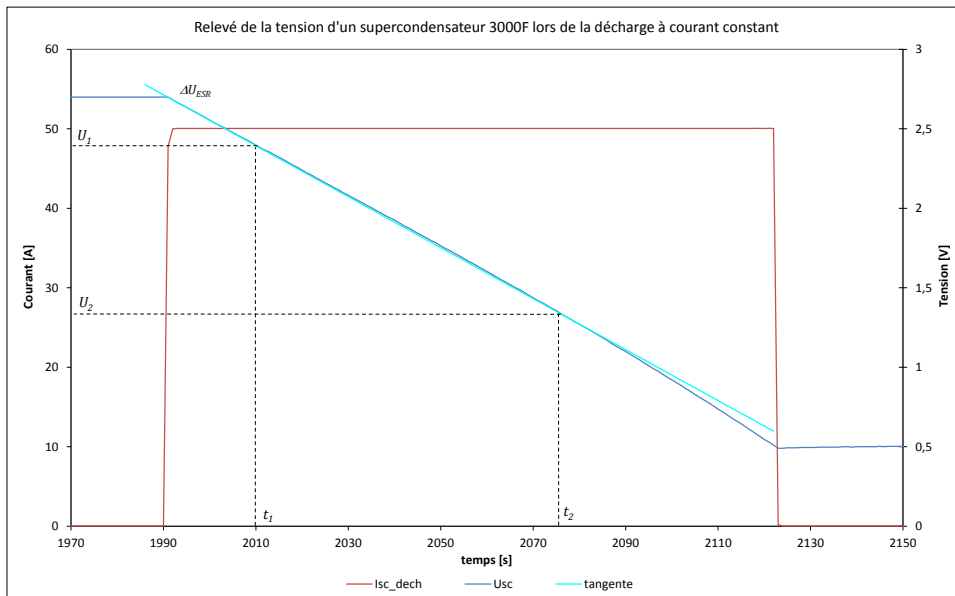


FIGURE III-5 : RELEVÉ DE LA TENSION D'UN SUPERCONDENSATEUR 3000F LORS DE LA DECHARGE A COURANT CONSTANT

Les résultats de l'identification des paramètres sont présentés de manière à les comparer aux fiches techniques des constructeurs dans un premier temps, puis à montrer l'influence de la température sur ces paramètres.

| Paramètres | Datasheets (à 25°C) | | Résultats issus de l'expérimentation | | |
|------------|---------------------|--------|--------------------------------------|-------------------|------|
| | C | ESR DC | C _{sc} | ESR _{DC} | T |
| Unité | [F] | [mΩ] | [F] | [mΩ] | [°C] |
| Maxwell | 3000 | 0,29 | 3032 | 0,35 | 24 |
| | 1200 | 0,58 | 1305 | 0,98 | 23 |
| | 650 | 0,80 | 690 | 1,74 | 25 |
| Batscap | 3000 | 0,25 | 2927 | 0,46 | 26 |
| | 1200 | 0,50 | 1251 | 0,98 | 23 |
| | 650 | 0,90 | 736 | 1,32 | 25 |

TABLEAU III-4 : COMPARAISON ENTRE LES PARAMETRES DES FICHES CONSTRUCTEURS ET CEUX ISSUS DE L'EXPERIMENTATION

Une comparaison des paramètres extraits des fiches techniques des constructeurs avec ceux issus des essais est donnée dans le Tableau III-4. Les valeurs obtenues expérimentalement sont cohérentes avec celles données par les fabricants. Concernant les supercondensateurs Maxwell, les valeurs de capacité mesurées sont comprises dans l'intervalle de tolérance indiqué dans les fiches techniques, qui est de [0 ; +20]%. Batscap n'indique pas de tolérance sur la capacité. Pour les composants Batscap, la variation de capacité mesurée est de [-5 ; +20]%. Quant à la valeur de la résistance série, les écarts sont plus importants. Cela s'explique par le manque de précision de la mesure, sur une valeur de résistance faible, en absolu ($< 1\text{m}\Omega$). En effet, la résistance est déterminée à partir d'une chute de tension qui est de l'ordre de $0,02\text{V}$, soit moins de 1% de la tension nominale.

En outre, les essais ont été menés à différentes températures selon la procédure de test. L'évolution de la capacité en fonction de la température est donnée en Figure III-6. La variation de la capacité est de l'ordre de 1 à 3% quel que soit le fabricant et quelle que soit la valeur nominale de la capacité. Par conséquent, la température n'a pas d'influence significative sur la capacité d'un supercondensateur. Concernant la résistance série, dont la mesure est assez peu précise, sa variation en fonction de la température est difficile à évaluer.

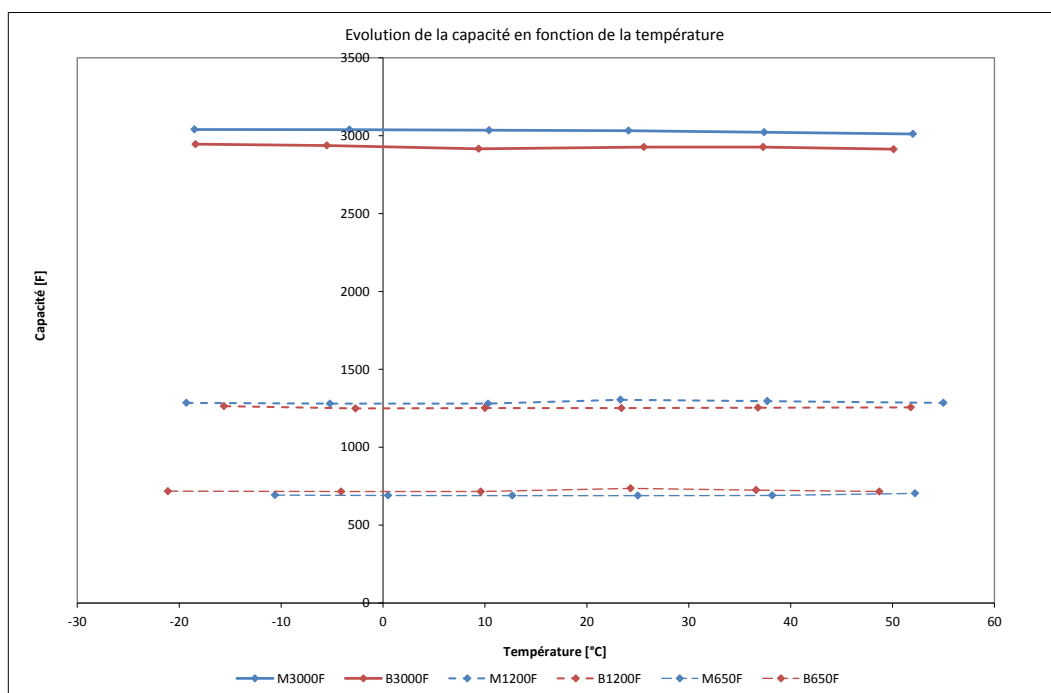


FIGURE III-6 : EVOLUTION DE LA CAPACITE D'UN SUPERCONDENSATEUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

Enfin, la simulation du modèle est réalisée avec Matlab® Simulink (Cf. Figure III-7) et comparée avec les relevés expérimentaux, pour des composants de capacité différente et à trois températures (Cf. Figure III-8, Figure III-9 et Figure III-10). La convention utilisée pour ce modèle est la suivante : lorsque le courant est positif, le supercondensateur se décharge ; lorsque le courant est négatif, il se recharge.

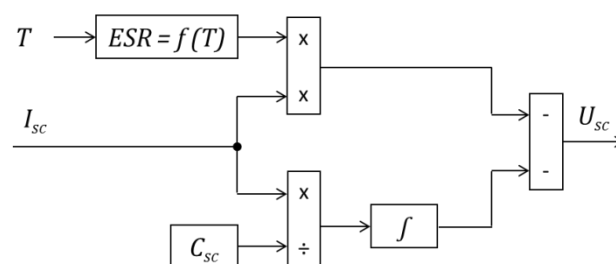


FIGURE III-7 : SYNOPTIQUE DU MODELE STANDARD SOUS MATLAB SIMULINK

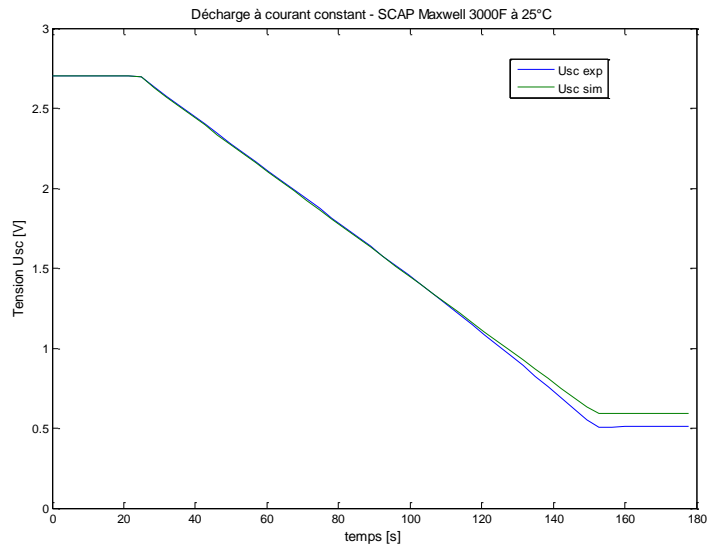


FIGURE III-8 : COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION DU MODELE STANDARD ET L'EXPERIMENTATION – SCAP M3000F A 25°C

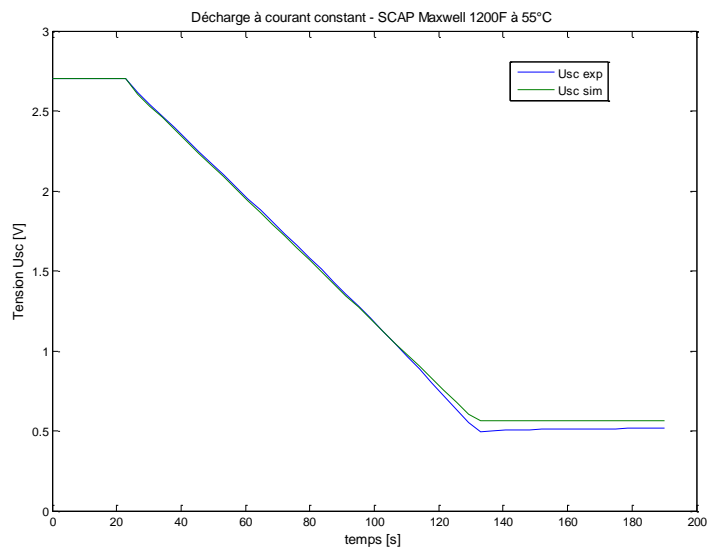


FIGURE III-9 : COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION DU MODELE STANDARD ET L'EXPERIMENTATION – SCAP M1200F A 55°C

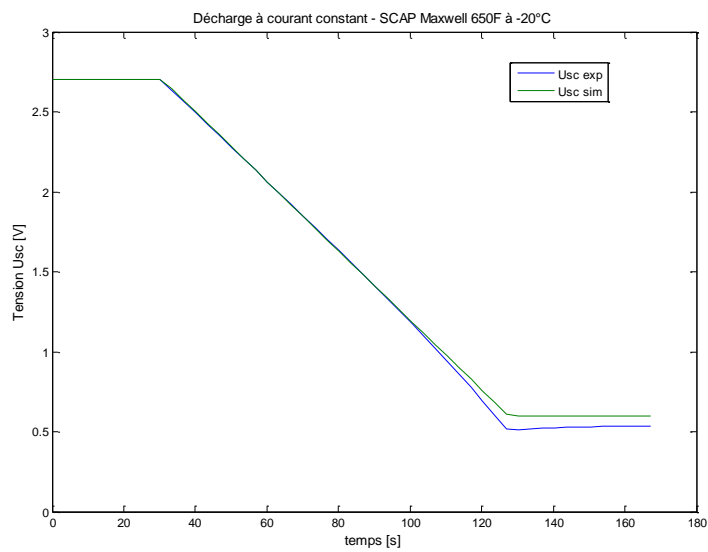


FIGURE III-10 : COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION DU MODELE STANDARD ET L'EXPERIMENTATION – SCAP M650F A -20°C

Les relevés expérimentaux sont également comparés à la simulation du modèle standard contenant les paramètres donnés par les constructeurs, comme par exemple en Figure III-11, pour le composant Maxwell 3000F à 25°C.

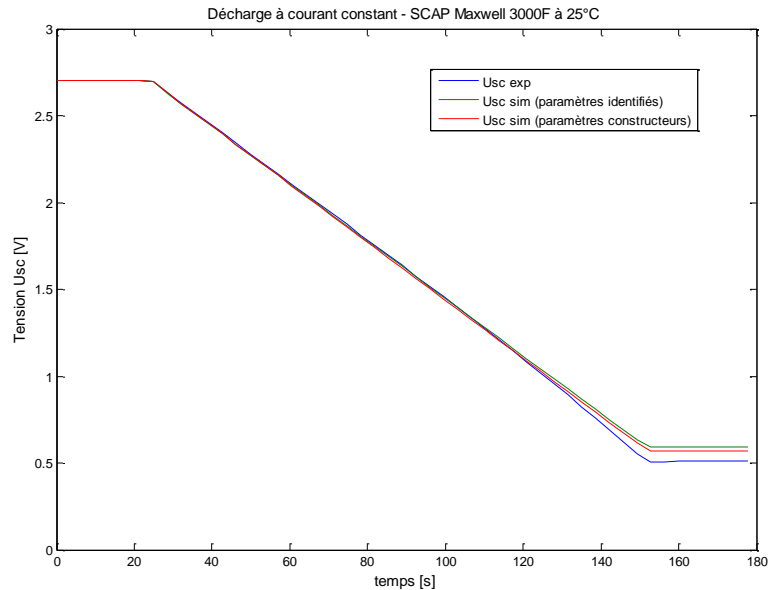


FIGURE III-11 : SIMULATION DU MODELE STANDARD (PARAMETRES IDENTIFIES ET CONSTRUCTEURS) – SCAP M3000F A 25°C

La simulation du modèle standard, avec des paramètres identifiés à partir des expérimentations ou donnés par les fabricants, donne des résultats proches de l'expérimentation, ce qui est satisfaisant par rapport au domaine de validité de ce modèle. Néanmoins, on peut noter deux points pour lesquels le modèle standard montre ses limites : le premier est l'écart notable, de l'ordre de 15%, à basse tension (en dessous de 1V environ). Ceci est dû au fait que le modèle standard ne tient pas compte de la variation de la capacité en fonction de la tension aux bornes du composant. Le deuxième point est la variation de tension à l'issue de la décharge. Le modèle considère que la tension n'évolue plus quand le courant de charge ou de décharge est nul. Or ce n'est pas le cas en réalité, puisqu'intervient le phénomène de redistribution des charges à l'issue d'une période de charge ou de décharge. Il peut être intéressant de prendre en compte ces deux aspects dans un modèle fonctionnel, c'est pourquoi le modèle à deux branches R-C est proposé dans le paragraphe suivant.

3 CARACTERISATION POUR LA DETERMINATION DU MODELE A DEUX BRANCHES R-C

Cette partie est consacrée à la caractérisation des supercondensateurs en vue d'identifier les paramètres du modèle à deux branches R-C. Dans un premier temps, le modèle issu de la littérature est présenté. Ensuite le protocole de test et la méthode d'identification des paramètres du modèle sont détaillés. Puis une analyse des résultats est proposée avec notamment une comparaison avec les résultats précédents. Enfin, l'identification des paramètres est réalisée et le modèle simulé sous Matlab® Simulink.

3.1 PRESENTATION DU MODELE A DEUX BRANCHES R-C

Le modèle à deux branches R-C qui est développé dans ce paragraphe est issu du modèle de Zubieta & Bonert [67]. Ce dernier est un modèle par circuit électrique équivalent, composé des trois branches R-C en parallèle, dont les constantes de temps sont différentes de manière à représenter divers phénomènes

observables dans un supercondensateur. Ce modèle est donc présenté en premier lieu avant d'expliquer pourquoi on n'en retient que les deux premières branches.

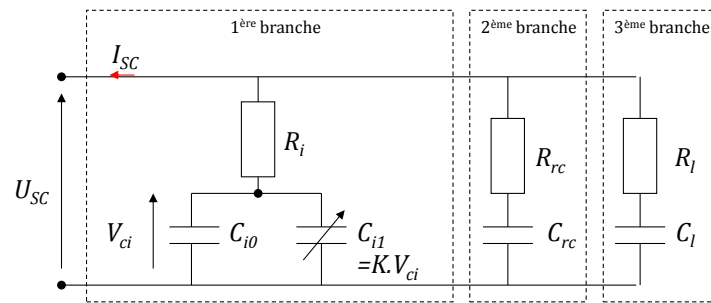


FIGURE III-12 : MODELE DE ZUBIETA & BONERT D'UN SUPERCONDENSATEUR

La première branche ou branche principale représente le phénomène de charge ou de décharge. Cette première branche est composée d'une résistance R_i en série avec deux condensateurs en parallèle : un condensateur C_{i0} indépendant de la tension et un condensateur C_{i1} dépendant de la tension aux bornes du composant. La constante de temps de cette première branche R-C est de l'ordre de la seconde.

La deuxième branche représente la redistribution des charges, phénomène observé après une période de charge ou de décharge, lorsque le courant est nul dans le circuit de charge ou de décharge. Cette deuxième branche est constituée d'une résistance R_{rc} en série avec un condensateur C_{rc} ; sa constante de temps est de l'ordre de quelques minutes.

Enfin la troisième branche représente le phénomène d'autodécharge. Cette branche, composée d'une résistance R_l en série avec un condensateur C_l , a une constante de temps de l'ordre de plusieurs minutes, voire de l'heure.

En comparaison avec le modèle standard développé au paragraphe III.2, ce modèle de Zubieta & Bonert prend en compte l'influence de la tension aux bornes du supercondensateur sur sa capacité, ainsi que les phénomènes lents tels que la redistribution des charges et l'autodécharge intervenant après une sollicitation électrique du composant. Cependant, les première et deuxième branches peuvent être suffisantes pour modéliser un supercondensateur en vue de son intégration dans un modèle complet. D'ailleurs, le modèle de Zubieta & Bonert est souvent utilisé, tout ou partie, pour modéliser un pack de supercondensateurs dans un système électrique complexe [55], [56]. Dans cette application, les supercondensateurs sont utilisés avec une fréquence de cyclage élevée et la tension à leurs bornes est maintenue (régulation autour d'une référence en tension), ce qui limite l'autodécharge. Par conséquent un modèle à deux branches R-C convient (Cf. Figure III-13), la troisième branche à grande constante de temps étant inutile.

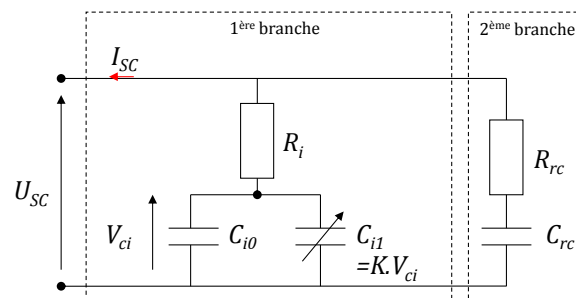


FIGURE III-13 : MODELE A DEUX BRANCHES R-C D'UN SUPERCONDENSATEUR

3.2 PROCEDURE DE CARACTERISATION

Comme pour la détermination du modèle standard, la caractérisation des supercondensateurs, en vue de déterminer les paramètres du modèle à deux branches R-C, est effectuée par chronopotentiométrie. La procédure de test consiste à appliquer au composant un créneau de courant et à relever la tension à ses bornes en réponse à la sollicitation en courant [67].

Dans le modèle à deux branches R-C, chaque branche correspond à une phase de l'essai. La première phase est la charge du composant : on applique à l'EST initialement déchargé, un courant constant de manière à faire évoluer la tension à ses bornes entre $U_{sc,min}$ et $U_{sc,nom}$. La deuxième phase se produit à l'ouverture du circuit de puissance quand l'EST est chargé : on suit alors l'évolution de la tension pendant plusieurs minutes afin d'observer le phénomène de redistribution des charges.

La valeur nominale du courant lors de la charge est la même que celle définie pour les essais de charge/décharge à courant constant (Cf. paragraphe III.2.2) et les essais sont effectués à 25°C.

3.3 METHODE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE A DEUX BRANCHES R-C

Plusieurs méthodes sont envisageables pour identifier les paramètres du modèle à deux branches R-C. Celle décrite par Zubieta [67] consiste en une analyse graphique par étapes successives. Les paramètres sont alors déterminés un par un, en posant des hypothèses de variations de tension (par exemple 50mV) et de temps (par exemple 20ms) difficilement justifiables et adaptables pour des composants de caractéristiques différentes. L'inconvénient de cette méthode est donc son manque de généralité. Une autre méthode, proposée notamment par Solano-Martinez [55], consiste à identifier tous les paramètres à la fois en minimisant l'écart entre les résultats issus du modèle et de la mesure, par la méthode des moindres carrés. L'identification des paramètres peut être réalisée par cette méthode et simplifiée en séparant les deux branches. Ainsi, la première branche est identifiée sur la période de charge et la deuxième branche est identifiée sur la période de redistribution des charges, pendant laquelle la première branche se décharge dans la deuxième.

3.4 RESULTATS DE LA CARACTERISATION ET MODELISATION

Ce paragraphe est dédié à la présentation des relevés expérimentaux et à l'identification des paramètres du modèle à deux branches R-C.

En Figure III-14, est donné le relevé de la tension aux bornes d'un supercondensateur 1200F, en réponse à l'application d'un créneau de courant d'amplitude 25A. L'évolution de la tension est également observée après l'ouverture du circuit de puissance. On note qu'en 30 minutes, la tension passe de 2,7V ($U_{sc,nom}$) à 2,55V (tension stabilisée).

Les résultats de l'identification des paramètres sont présentés dans le but de comparer les technologies Maxwell et Batscap dans un premier temps et de montrer particulièrement l'influence de la tension sur la capacité. Enfin, les paramètres du modèle deux branches R-C sont confrontés aux paramètres du modèle standard.

Les paramètres du modèle à deux branches R-C sont donnés dans le Tableau III-5 pour des composants Maxwell et Batscap de capacité nominale 1200F. On constate que ces paramètres sont du même ordre de grandeur pour les deux composants. La décomposition de la capacité en deux grandeurs C_{i0} et C_{i1} ($C_{i1}=K.V_{ci}$) permet de mettre en évidence l'impact de la tension sur la valeur de la capacité. L'influence de la tension sur la capacité est équivalente chez les deux constructeurs.

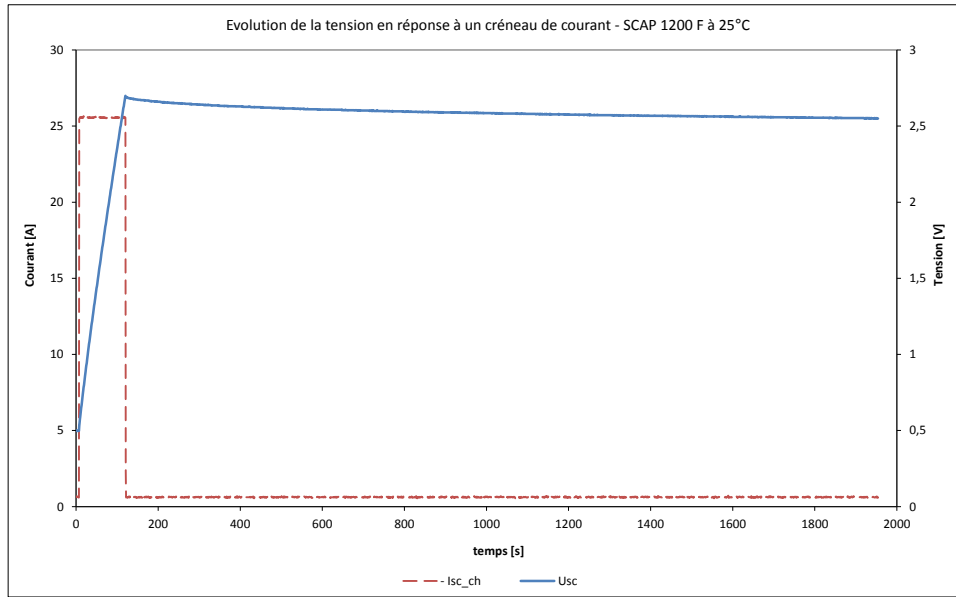


FIGURE III-14 : RELEVÉ DE LA TENSION D’UN SUPERCONDENSATEUR M1200F EN REPONSE A UN CRENEAU DE COURANT

| Paramètres | Unité | Maxwell 1200F | Batscap 1200F |
|------------|----------------------|---------------|---------------|
| R_i | [mΩ] | 0,85 | 0,91 |
| C_{i0} | [F] | 960 | 980 |
| K | [F.V ⁻¹] | 200 | 180 |
| R_{rc} | [Ω] | 5,6 | 5,8 |
| C_{rc} | [F] | 200 | 200 |

TABLEAU III-5 : COMPARAISON DES PARAMETRES DU MODELE A DEUX BRANCHES R-C – MAXWELL ET BATSCAP 1200F

La résistance R_i est proche de la résistance ESR_{DC} du modèle standard, déterminée lors des essais de charge et décharge à courant constant. Pour comparer les capacités du modèle standard et de la première branche, il est nécessaire de définir une capacité équivalente, en termes de stockage d’énergie, aux deux capacités de la première branche.

L’énergie stockée dans les condensateurs de la première branche du modèle peut s’écrire comme suit [67] :

$$W_{branche1} = \int v_{ci} \cdot i \cdot dt = \int v_{ci} \cdot dQ = \int v_{ci} \cdot (C_{i0} + K \cdot v_{ci}) \cdot dv_{ci} = \frac{1}{2} C_{eq} \cdot v_{ci}^2 \quad \text{III-10}$$

La capacité équivalente, au sens de la capacité de stockage d’énergie, est alors définie par la relation :

$$C_{eq} = C_{i0} + \frac{2}{3} \cdot K \cdot v_{ci} \quad \text{III-11}$$

Le Tableau III-6 propose une comparaison de la capacité C_{sc} du modèle standard, déterminée par un essai de décharge à courant constant, et de la capacité C_{eq} du modèle à deux branches R-C (selon la relation III-11), pour des supercondensateurs 1200F à l’état chargé. Les valeurs obtenues par les deux méthodes sont cohérentes pour les deux fabricants.

| Paramètres | Unité | Maxwell 1200F | Batscap 1200F |
|------------|-------|---------------|---------------|
| C_{sc} | [F] | 1305 | 1251 |
| C_{eq} | [F] | 1318 | 1271 |

TABLEAU III-6 : COMPARAISON DES CAPACITES DE STOCKAGE – MODELE STANDARD ET MODELE A DEUX BRANCHES R-C

Enfin, la simulation du modèle à deux branches R-C est réalisée avec Matlab® Simulink (Cf. Figure III-15) et comparée avec les relevés expérimentaux en Figure III-16.

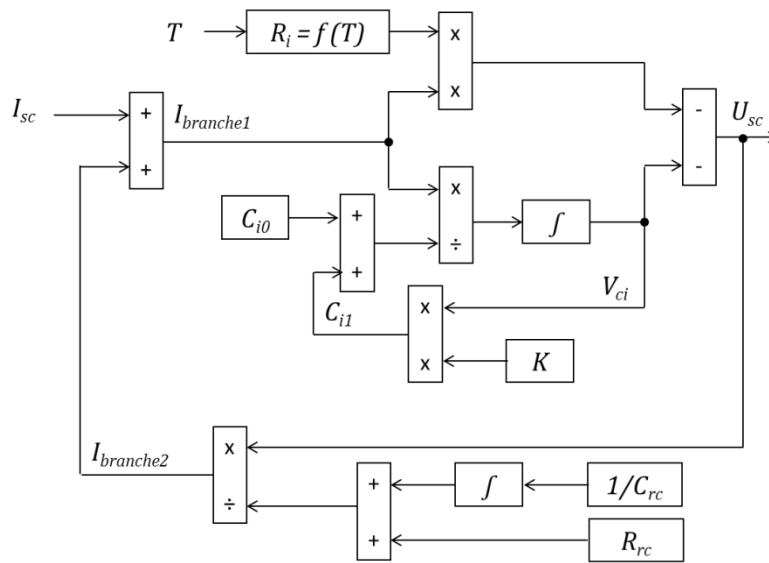


FIGURE III-15 : SYNOPTIQUE DU MODELE A DEUX BRANCHES R-C SOUS MATLAB SIMULINK

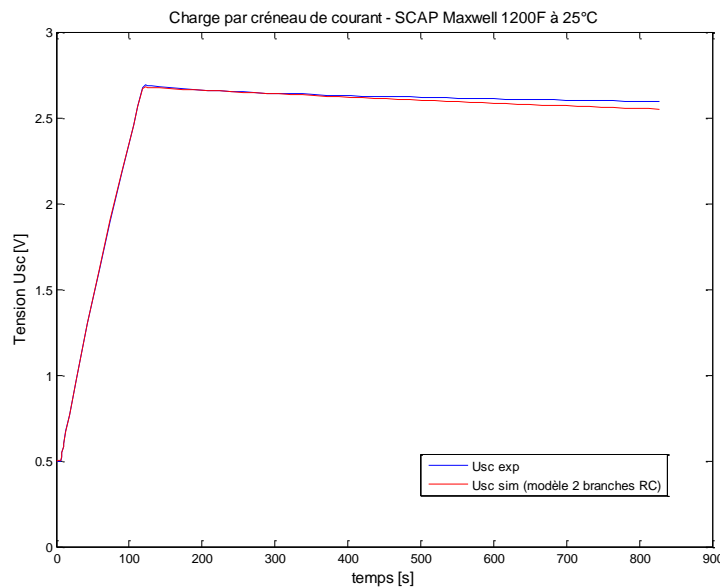


FIGURE III-16 : COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION DU MODELE A 2 BRANCHES RC ET L'EXPERIMENTATION – SCAP M1200F A 25°C

Sur la période où le courant est appliqué, la tension aux bornes du composant évolue de manière non linéaire. La simulation du modèle à deux branches R-C suit bien cette évolution. L'erreur entre les résultats issus de la simulation et ceux issus de l'expérimentation est inférieure à 1% sur la période de charge. En revanche, à la fin de la période de redistribution des charges, la tension obtenue par simulation du modèle diverge légèrement de la tension relevée expérimentalement. Cet écart, de l'ordre de 2%, est dû au fait que le modèle ne comporte que deux branches et que la constante de temps de la deuxième branche est de quelques minutes.

On propose de comparer par simulation les réponses du modèle à deux branches et du modèle standard en Figure III-17. On constate que le premier est plus proche de l'expérimentation sur le tracé de l'écart entre les modèles et la mesure. L'écart absolu est plus faible pour le modèle à deux branches sur la période de charge grâce à la prise en compte de la variation de la capacité avec la tension, et sur la période post-charge grâce à la modélisation du phénomène de redistribution des charges.

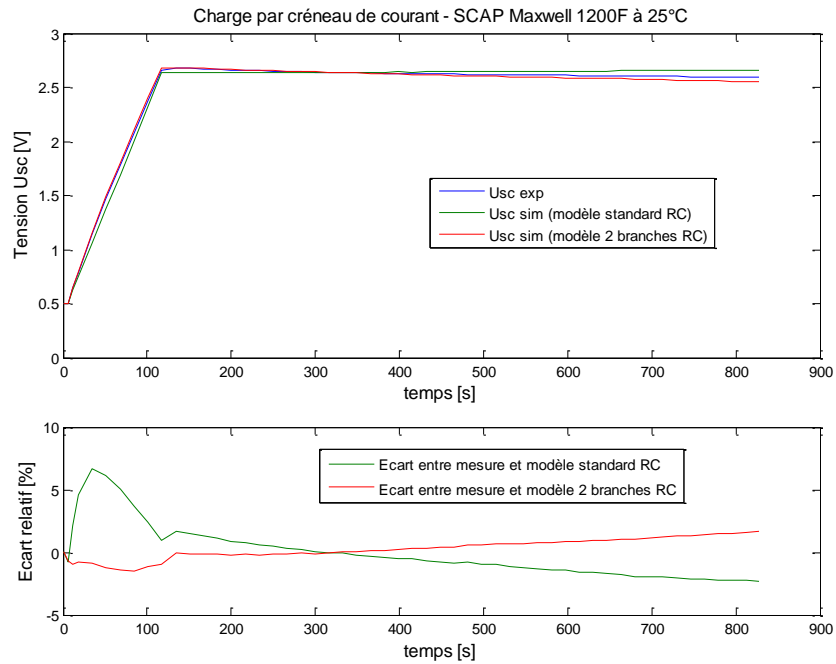


FIGURE III-17 : COMPARAISON ENTRE L'EXPERIMENTATION ET LA SIMULATION DU MODELE STANDARD ET DU MODELE A 2 BRANCHES RC – CHARGE PAR CRENEAU DE COURANT – SCAP MAXWELL 1200F A 25°C

En outre, la comparaison de la réponse du modèle à deux branches lors d'une décharge à courant constant avec celle du modèle standard montre également que le premier est plus précis, particulièrement à faible tension (l'écart avec l'expérimentation est de 20% pour le modèle standard et de quelques pourcents pour le modèle à deux branches), grâce à l'intégration de la variation de la capacité avec la tension à ses bornes (Cf. Figure III-18). Les résultats de simulation pour les autres supercondensateurs sont donnés en Annexe 5, notamment la comparaison de la réponse des modèles standard et à deux branches lors d'une décharge à courant constant à 25°C pour le composant B1200F (les paramètres du modèle à deux branches pour ce composant sont donnés dans le Tableau III-5).

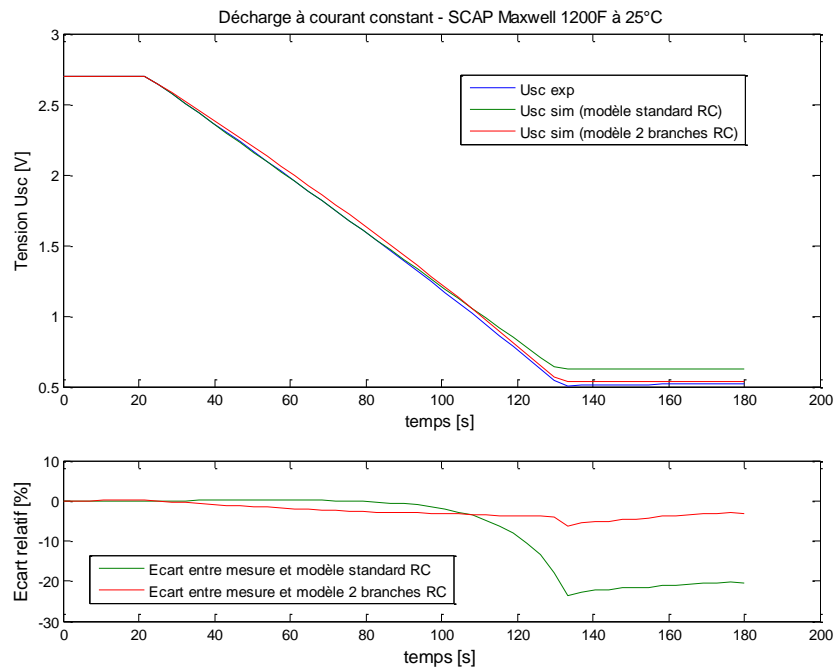


FIGURE III-18 : COMPARAISON DES MODELES – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP MAXWELL 1200F A 25°C

Pour conclure sur le modèle à deux branches R-C, il présente l'intérêt de prendre en compte la variation de la capacité en fonction de la tension, ce qui est positif par rapport au modèle standard. De plus il possède une deuxième branche, représentant des phénomènes basses fréquences intervenant après une sollicitation électrique du composant. Cet aspect, bien que moins facile à quantifier (car les courants associés à ces phénomènes sont faibles), est un avantage par rapport au modèle standard, qui ne prend pas en considération ce phénomène de redistribution des charges.

Ce modèle fonctionnel traduit relativement bien le comportement du supercondensateur en régime permanent et pour les transitoires à dynamique moyenne (de l'ordre de la seconde). Mais pour observer le comportement des supercondensateurs à des dynamiques plus élevées, il est nécessaire de considérer un modèle intégrant une impédance harmonique, dont les caractéristiques sont identifiées à partir de spectrométries. Le paragraphe suivant est dédié à l'étude d'un modèle dynamique.

4 CARACTERISATION POUR LA DETERMINATION DU MODELE DYNAMIQUE

4.1 PRESENTATION DU MODELE DYNAMIQUE

Le modèle dynamique est un modèle par circuit électrique équivalent composé d'une résistance (représentant les pertes aux interfaces mécaniques de type connectique) et d'une impédance complexe. Ce modèle comportemental représente les phénomènes de constantes de temps différentes se produisant dans un supercondensateur.

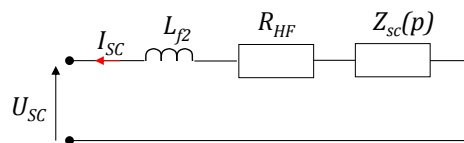


FIGURE III-19 : MODELE DYNAMIQUE D'UN SUPERCONDENSATEUR

- Avec :
- R_{HF} : résistance en hautes fréquences [Ω], représentant pertes dans le séparateur (électrolyte) et les pertes par contact (connexion, électrodes)
 - Z_{sc} : impédance complexe [Ω], représentant les phénomènes de transfert de charge et de double couche électrique, ainsi que les phénomènes à basses fréquences
 - L_{fz} : inductance [H], représentant le comportement inductif du composant à hautes fréquences

4.2 PROCEDURE DE CARACTERISATION

La caractérisation des supercondensateurs en vue d'établir un modèle dynamique est effectuée par Spectrométrie d'Impédance Electrochimique (SIE). L'étude par impédancemétrie peut être réalisée selon deux modes de fonctionnement : mode galvanostat et mode potentiostat, comme cela a été détaillé dans le paragraphe II.4.2. Dans la littérature, ces deux méthodes sont mises en œuvre, avec une précaution particulière pour le mode galvanométrique [68], [69]. En effet, dans ce mode, on applique un courant sinusoïdal sans composante continue, de manière à maintenir une tension constante aux bornes du composant. Le mode potentiométrique est également utilisé [70], en appliquant une tension sinusoïdale autour d'une tension de polarisation.

Pour cette étude, les supercondensateurs sont testés en mode potentiométrique. Les essais sont effectués autour de plusieurs points de fonctionnement, à savoir aux tensions 2,7V, 2,0V, 1,3V et 0,5V. L'amplitude de la tension sinusoïdale superposée à la tension de polarisation est adaptée en fonction de la valeur de la résistance

interne des composants. Etant généralement de l'ordre de 10mV selon [70], l'amplitude maximum de la tension sinusoïdale est fixée à 10mV pour ces essais.

La plage de fréquence sur laquelle les spectrométries sont effectuées est choisie en fonction des phénomènes que l'on cherche à observer et en fonction de l'application du modèle. Dans notre cas, la gamme de fréquence balayée est $[50.10^{-3} ; 20.10^3]$ Hz. Cette gamme de fréquence est en lien avec l'Application et fixée par la stratégie de gestion d'énergie dans la poutre complète. Celle-ci prévoit que les supercondensateurs interviennent pour fournir à la poutre une puissance à dynamique relativement élevée (entre 1 et 100Hz). De plus, les supercondensateurs du bus n°1 sont associés à un convertisseur statique dont la fréquence de découpage est de l'ordre de 20kHz. Il est intéressant de connaître le comportement des supercondensateurs à ce niveau de fréquence, donc les spectrométries sont menées jusqu'à 20kHz. Enfin la limite inférieure de l'intervalle de fréquence est abaissée à quelques dizaines de milli-Hertz car dans certaines configurations de la poutre, il est envisageable de solliciter les supercondensateurs pour suppléer les accumulateurs sur des profils de charge moins dynamiques. Il n'est cependant pas nécessaire de descendre trop bas en fréquence car les supercondensateurs sont très sollicités pendant une mission (leur temps de repos n'excède pas la minute).

Après avoir déterminé la plage de fréquence à balayer en SIE, il reste à préciser le nombre de points par décade et le nombre de mesures effectuées par période, dont vont dépendre la précision des mesures et la durée de l'essai. Pour cette étude, le nombre de points par décade est de 20 au-delà de 66Hz et 6 en dessous de cette fréquence. Les mesures sont réalisées sur 10 périodes, pour toute la plage de fréquence.

Enfin, les essais sont effectués aux températures suivantes : -20°C , -5°C , $+10^{\circ}\text{C}$, $+25^{\circ}\text{C}$, $+40^{\circ}\text{C}$ et 55°C , selon les préconisations des fournisseurs. L'équipement sous test est, préalablement aux spectrométries, maintenu à la température de test pendant une durée suffisante pour atteindre la stabilisation thermique du composant.

4.3 METHODE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE DYNAMIQUE

Les spectres d'impédance obtenus lors des essais sont exploités sous la forme de diagramme de Nyquist¹² ou diagramme de Bode. La première étape dans l'identification des paramètres du modèle dynamique consiste à interpréter ces relevés de manière à associer leur allure aux paramètres du modèle.

Si l'on considère un tracé typique de l'impédance complexe d'un supercondensateur dans le plan de Nyquist (Cf. Figure III-20), on distingue une zone où la partie imaginaire est négative représentant le comportement capacitif du composant et une zone où la partie imaginaire est positive représentant son comportement inductif (en hautes fréquences).

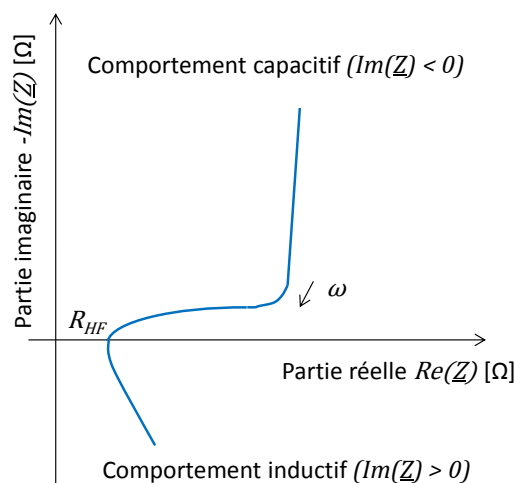


FIGURE III-20 : REPRESENTATION TYPIQUE DE L'IMPEDANCE D'UN SUPERCONDENSATEUR DANS LE PLAN DE NYQUIST

¹² Les diagrammes de Nyquist dans ce chapitre sont présentés comme ceux du chapitre 2, à savoir l'opposé de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle et uniquement la partie capacitive, selon la convention en électrochimie.

La valeur de l'inductance L_{f2} peut être obtenue, en appliquant la relation suivante :

$$L_{f2} \approx \frac{\text{Im}_{HF}(\underline{Z})}{\omega} \quad \text{III-12}$$

Avec : $\text{Im}_{HF}(\underline{Z})$: partie imaginaire [Ω] de l'impédance complexe (en hautes fréquences)
 ω : pulsation [rad.s^{-1}], où $\omega = 2.\pi.f$ avec f , la fréquence [Hz]

L'identification de la résistance dite « hautes fréquences » R_{HF} est facilement réalisable sur le diagramme. Cette résistance correspond à la valeur de l'impédance lorsque celle-ci est purement résistive, c'est-à-dire quand la partie imaginaire est nulle.

En ce qui concerne l'impédance $Z_{sc}(p)$, elle peut être représentée en première approximation par un circuit équivalent composé d'un condensateur C_{BF} et un dipôle R - C pour représenter le phénomène de transfert de charge et de double couche électrique (Cf. Figure III-21).

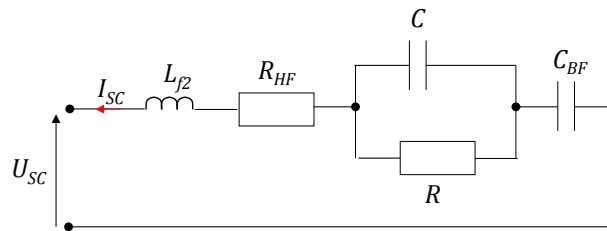


FIGURE III-21 : MODELE DYNAMIQUE AVEC UN CIRCUIT EQUIVALENT A CONSTANTES LOCALISEES

La représentation dans le plan de Nyquist du circuit équivalent « $R_{HF} + C_{BF} + R//C$ » est donnée en Figure III-22, pour deux valeurs de capacité C . En trait plein, la valeur de C est telle que l'arc formé par le circuit $R//C$ ne couvre pas les basses fréquences associées à C_{BF} ; en pointillés, la valeur de C est telle qu'il y a recouvrement entre l'arc du circuit $R//C$ et la droite de la capacité C_{BF} . L'identification des paramètres R_{HF} , C_{BF} , R et C est réalisée à partir d'une analyse fréquentielle des spectres d'impédance. L'écart entre les parties réelle et imaginaire du modèle et celles relevées expérimentalement est minimisé en appliquant la méthode des moindres carrés (selon la relation III-13).

$$\text{Ecart} = \sum_{\omega} \left[\left(\text{Re}(\underline{Z}_{exp}) - \text{Re}(\underline{Z}_{mod}) \right)^2 + \left(\text{Im}(\underline{Z}_{exp}) - \text{Im}(\underline{Z}_{mod}) \right)^2 \right] \quad \text{III-13}$$

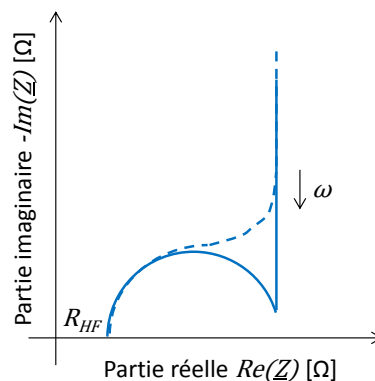


FIGURE III-22 : REPRESENTATION DANS LE PLAN DE NYQUIST DU CIRCUIT $R_{HF} + C_{BF} + R//C$

Selon De Levie [71], l'impédance $Z_{sc}(p)$ peut être remplacée par l'impédance harmonique d'une ligne de transmission, dont l'expression est la suivante :

$$Z_{harm}(p) = \frac{\tau_{LT} \cdot \coth(\tau_{LT} \cdot p)^{1/2}}{C_{BF} \cdot (\tau_{LT} \cdot p)^{1/2}} \quad \text{III-14}$$

Où τ_{LT} est la constante de temps de la ligne de transmission ($\tau_{LT} = R_{LT} \cdot C_{BF}$)

Avec : C_{BF} : capacité du supercondensateur à basses fréquences [F]

R_{LT} : résistance équivalente de la ligne de transmission [Ω]

Une étude aux limites de cette impédance, proposée par Rizoug [72], donne les résultats suivants :

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} Re(Z_{harm}(j\omega)) = \frac{R_{LT}}{3} \quad \text{III-15}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} Im(Z_{harm}(j\omega)) = \frac{-1}{C_{BF} \cdot \omega} \quad \text{III-16}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(\frac{Re(Z_{harm}(j\omega))}{-Im(Z_{harm}(j\omega))} \right) = 1 \quad \text{III-17}$$

Cette impédance a un comportement purement capacitif à basses fréquences. Le tracé de cette impédance dans le plan de Nyquist admet deux asymptotes : une asymptote verticale (à basses fréquences) et une asymptote oblique de pente 1 (formant un angle de 45° avec l'axe des réels). En cela, cette impédance harmonique traduit mieux que le circuit « $C_{BF} + R//C$ » le comportement du supercondensateur, particulièrement à moyennes fréquences (Cf. Figure III-23).

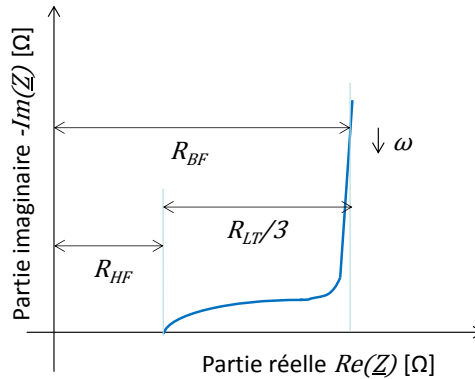


FIGURE III-23 : IDENTIFICATION DES PARAMETRES D'UNE LIGNE DE TRANSMISSION A PARTIR D'UNE REPONSE FREQUENTIELLE

La transformation inverse de l'impédance harmonique d'une ligne de transmission donne son expression dans le domaine temporel [72] :

$$Z_{harm}(t) = \frac{1}{C_{BF}} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \exp\left(\frac{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{R_{LT} \cdot C_{BF}}\right) \right) \quad \text{III-18}$$

La ligne de transmission est donc équivalente à une somme de circuits $R_n // C_n$. Ces paramètres sont exprimés ci-dessous, à partir d'une analyse fréquentielle (Cf. Figure III-23) :

$$R_n = \frac{2R_{LT}}{n^2 \cdot \pi^2} \quad \text{III-19}$$

$$R_{LT} = 3(R_{BF} - R_{HF}) \quad \text{III-20}$$

$$C_n = \frac{C_{BF}}{2} \quad \text{III-21}$$

Le circuit équivalent intégrant la ligne de transmission est donné en Figure III-24.

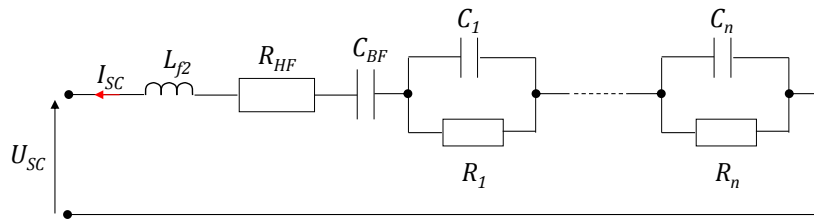


FIGURE III-24 : MODELE DYNAMIQUE AVEC UN CIRCUIT $R_n//C_n$ EQUIVALENT A UNE LIGNE DE TRANSMISSION

4.4 RESULTATS DE LA CARACTERISATION ET MODELISATION

Dans le paragraphe suivant, les relevés expérimentaux sont présentés et analysés pour permettre l'identification des paramètres du modèle dynamique. Les paramètres obtenus à partir de cette analyse fréquentielle sont comparés à ceux obtenus à partir des analyses temporelles précédentes. Enfin le modèle dynamique est simulé sous Matlab® Simulink et les résultats sont également comparés avec ceux de l'expérimentation dans les domaines fréquentiel et temporel.

4.4.1 CARACTERISATION EXPERIMENTALE ET IDENTIFICATION DES PARAMETRES

Pour des raisons de synthèse, l'ensemble des résultats n'est pas présenté dans ce paragraphe donc seuls quelques exemples sont traités. Néanmoins, l'analyse décrite ci-après a été réalisée sur tous les composants dans toutes les conditions de fonctionnement définies au paragraphe III.4.2. Ainsi, dans ce paragraphe, l'analyse de la partie réelle est effectuée sur le composant M3000F à 25°C, l'analyse de la partie imaginaire est menée sur le composant M1200F à 25°C et les simulations du modèle dynamique sont réalisées pour le composant M650F à 25°C.

Les spectres d'impédance dans le plan de Nyquist présentés en Figure III-25 sont issus des SIE effectuées sur un supercondensateur Maxwell 3000F à trois tensions et six températures. Les spectres des autres composants sont similaires et sont présentés en Annexe 5.

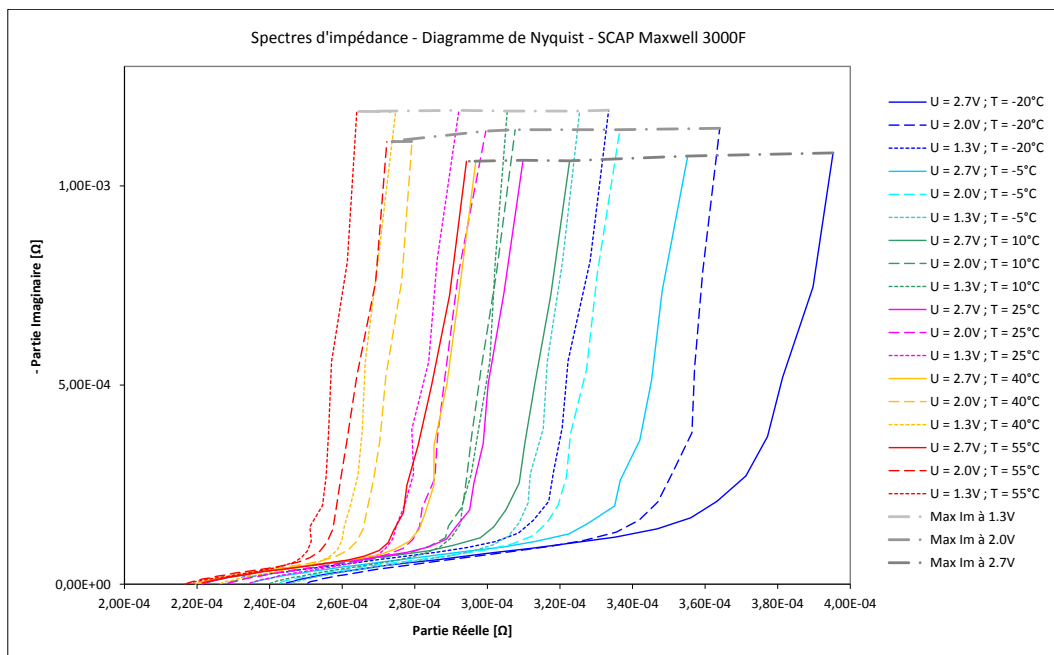


FIGURE III-25 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST – SCAP MAXWELL 3000F A PLUSIEURS TEMPERATURES ET TENSIONS

Sur les spectres de la Figure III-26, l'opposé de la partie imaginaire est représenté en fonction de la partie réelle sur la plage de fréquence $[50.10^{-3} ; 1.10^3]$ Hz. On y distingue bien les deux comportements capacitif en basses fréquences et inductif en hautes fréquences. La fréquence f_{0_sc} à laquelle la partie imaginaire change de sens est de 50Hz.

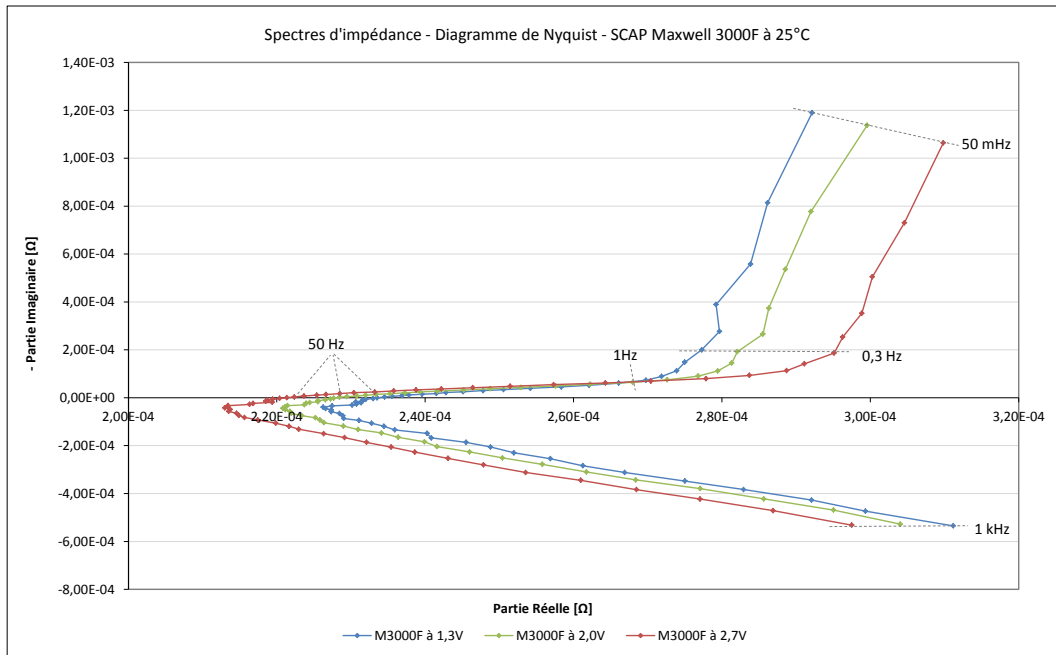


FIGURE III-26 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST – SCAP MAXWELL A 25°C ET A PLUSIEURS TENSIONS

Dans ce paragraphe, une analyse des parties réelle et imaginaire en fonction de la fréquence est proposée.

Analyse de la partie réelle – L'analyse de la partie réelle en fonction de la fréquence (Cf. Figure III-27) met en évidence l'évolution du comportement du supercondensateur sur des plages de fréquence distinctes. Elle est réalisée par exemple sur le composant Maxwell 3000F, mais peut être généralisée aux autres composants.

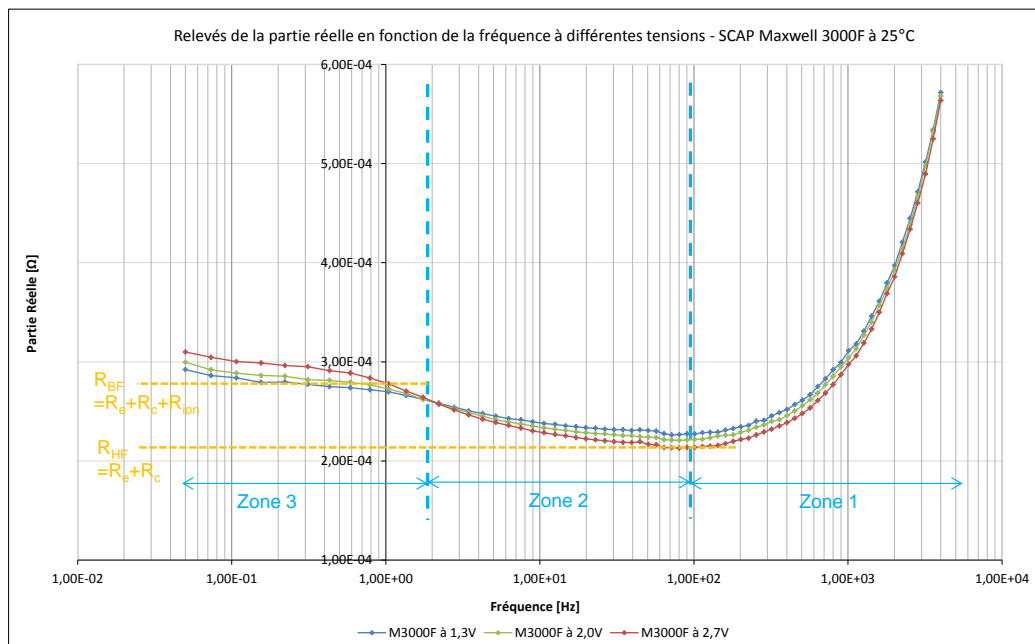


FIGURE III-27 : RELEVES DE LA PARTIE REELLE EN FONCTION DE LA FREQUENCE A 25°C ET A DIFFERENTES TENSIONS – SCAP M3000F

Une première zone est observable à très hautes fréquences (> 100Hz) correspondant au comportement selfique du composant. A ces niveaux de fréquence, l'inductance de fuite est prépondérante. Une deuxième zone peut être considérée entre 2Hz et 100Hz. Sur cette plage de fréquence, la valeur de la partie réelle est la plus faible. Elle correspond à la résistance représentant les pertes dans les contacts et les électrodes. Cette résistance dite « hautes fréquences » est donc composée d'une résistance de contact R_c et d'une résistance d'électrodes R_e . Les résistances R_c et R_e étant ohmiques, elles ne dépendent pas de la fréquence. Une troisième zone est définie sur l'intervalle $[50.10^{-3}; 2]$ Hz. Sur cette zone « basses fréquences », une résistance ionique R_{ion} vient s'ajouter aux résistances ohmiques R_c et R_e . Cette résistance R_{ion} est dépendante de la fréquence car elle traduit l'accessibilité des pores de charbon actif par les ions de l'électrolyte. A noter qu'une quatrième zone pourrait être mise en évidence à très basses fréquences (< 10mHz) si la spectrométrie avait été effectuée à ces fréquences. Il s'agirait alors d'observer les phénomènes très lents (typiquement l'autodécharge).

La résistance à basses fréquences, relevée sur la troisième zone, peut être assimilée à la résistance ESR_{DC} déterminée dans le modèle standard. Une comparaison de la résistance R_{BF} mesurée par SIE et de la résistance ESR_{DC} du modèle standard est proposée dans le Tableau III-7. Les valeurs de résistance sont du même ordre de grandeurs, bien qu'elles aient été obtenues par des méthodes différentes : essai à fort courant pour l'une et essai « petits signaux » pour l'autre.

| SCAP 3000F | Datasheets à 25°C | Résultats issus des expérimentations à 25°C | |
|----------------|-------------------|---|----------|
| Paramètres | ESR_{DC} | ESR_{DC} | R_{BF} |
| Unité | [mΩ] | [mΩ] | [mΩ] |
| Maxwell 3000 F | 0,29 | 0,35 | 0,30 |
| Batscap 3000 F | 0,25 | 0,46 | 0,48 |

TABLEAU III-7 : COMPARAISON DES RESISTANCES BF – DATASHEETS, ESSAIS DC ET SIE – SCAP 3000F

En outre, les spectrométries permettent de mesurer la valeur de la résistance à 1kHz. Dans le Tableau III-8, la résistance à 1kHz mesurée par SIE est comparée à la résistance ESR_{AC} déterminée selon la norme [64] et donnée par les constructeurs à 1kHz. Comme pour la résistance BF, l'écart entre la résistance mesurée et celle indiquée par les constructeurs est faible. On note en général que la résistance ESR_{AC} à 1kHz est inférieure à la résistance BF. Cependant, le choix de cette fréquence de 1kHz peut être remis en cause. En effet, l'observation des spectres relevés à différentes températures et tensions montre qu'à cette fréquence, la valeur de la partie réelle n'est pas la valeur minimale et que cette fréquence ne correspond pas à la fréquence $f_{0_{sc}}$ des composants. Par conséquent, cette grandeur ESR_{AC} n'est pas significative d'un comportement remarquable du composant et ne peut être assimilée à la résistance R_{HF} du modèle dynamique.

| SCAP 3000F | Datasheets à 25°C | Résultats par SIE à 25°C |
|----------------|-------------------|--------------------------|
| Paramètres | ESR_{AC} | R_{1kHz} |
| Unité | [mΩ] | [mΩ] |
| Maxwell 3000 F | 0,24 | 0,29 |
| Batscap 3000 F | / | 0,35 |

TABLEAU III-8 : COMPARAISON DES RESISTANCES A 1 KHZ – DATASHEETS ET SIE – SCAP 3000F

Pour terminer l'analyse de la partie réelle, il est intéressant d'observer l'évolution des résistances « basses fréquences » R_{BF} (ou $R_e + R_c + R_{ion}$) et « hautes fréquences » R_{HF} (ou $R_e + R_c$) en fonction de la température. Cette évolution pour différentes tensions de polarisation est donnée en Figure III-28 pour les supercondensateurs Maxwell 3000F et en Figure III-29 pour les composants Batscap de même capacité. On vérifie bien que R_{HF} est inférieure à R_{BF} et que l'influence de la tension de polarisation sur les valeurs de résistance est faible. On note, particulièrement chez Maxwell, que la résistance ohmique R_{HF} est peu sensible à la température, tandis que la résistance R_{BF} intégrant une résistance ionique évolue davantage avec la

température. Comme dans tout composant électrochimique où la température est un critère impactant les performances, dans un supercondensateur, l'élévation de la température provoque une diminution de la résistance en basses fréquences. A la vue de ces résultats, on peut considérer pour la modélisation que la résistance R_{HF} est constante, autrement dit que sa variation en fonction de la température ou de la tension aux bornes du composant est négligeable. Quant à la résistance R_{BF} , on peut modéliser son évolution en fonction de la température (par exemple en l'approchant par une droite) et négliger l'influence de la tension.

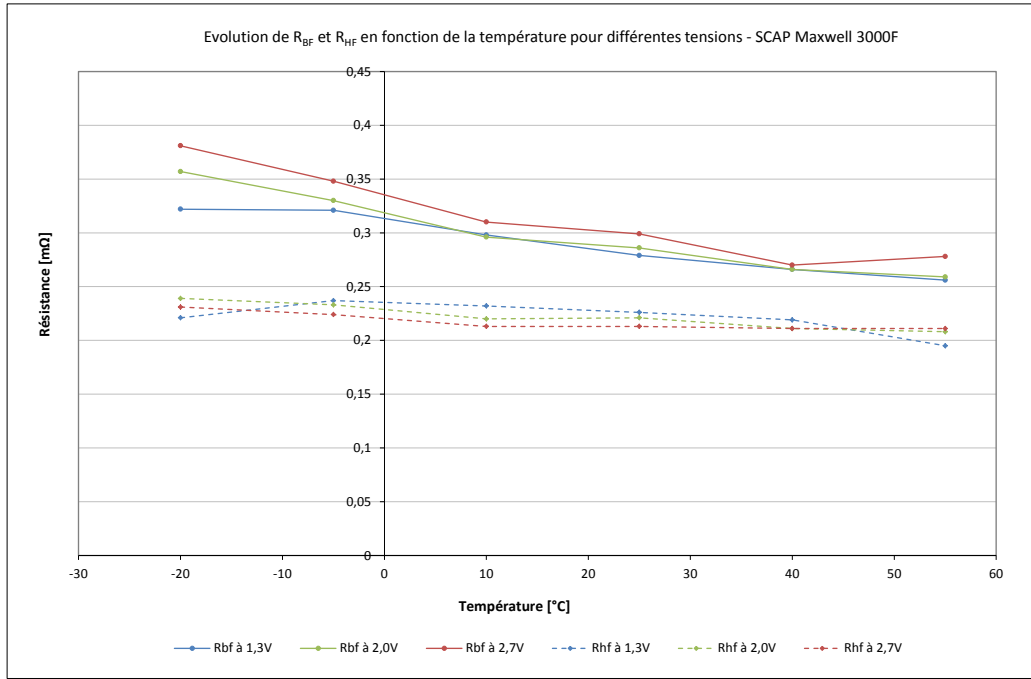


FIGURE III-28 : EVOLUTION DES RESISTANCES R_{BF} ET R_{HF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE – SCAP M3000F

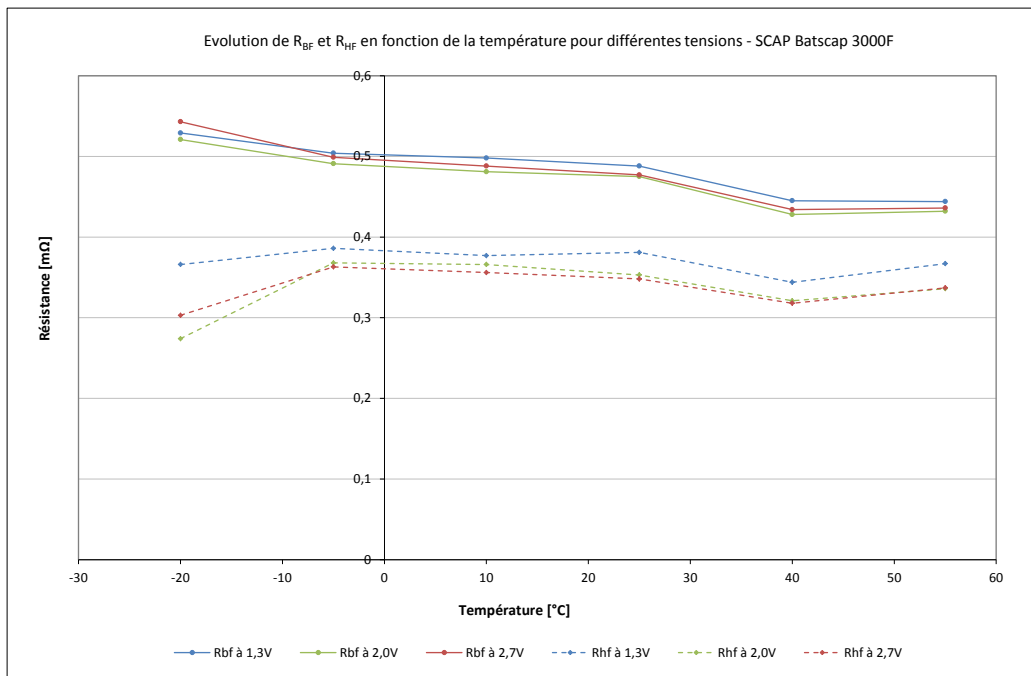


FIGURE III-29 : EVOLUTION DES RESISTANCES R_{BF} ET R_{HF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE – SCAP B3000F

Ces constatations sont valables également pour les composants de 1200F et 650F, dont l'évolution des résistances est donnée en Annexe 5.

Analyse de la partie imaginaire – L’analyse de la partie imaginaire en fonction de la fréquence met en évidence les comportements capacitif et inductif d’un supercondensateur. Le composant M1200F est pris en exemple. Le tracé de la partie imaginaire en fonction de la fréquence (Cf. Figure III-30) montre les deux comportements du composant et renseigne sur la fréquence $f_{0_{sc}}$, c’est-à-dire la fréquence à partir de laquelle l’impédance du composant n’est plus capacitive. Pour un supercondensateur Maxwell 1200F à 25°C, la fréquence $f_{0_{sc}}$ est de 30Hz, quelle que soit la tension de polarisation.

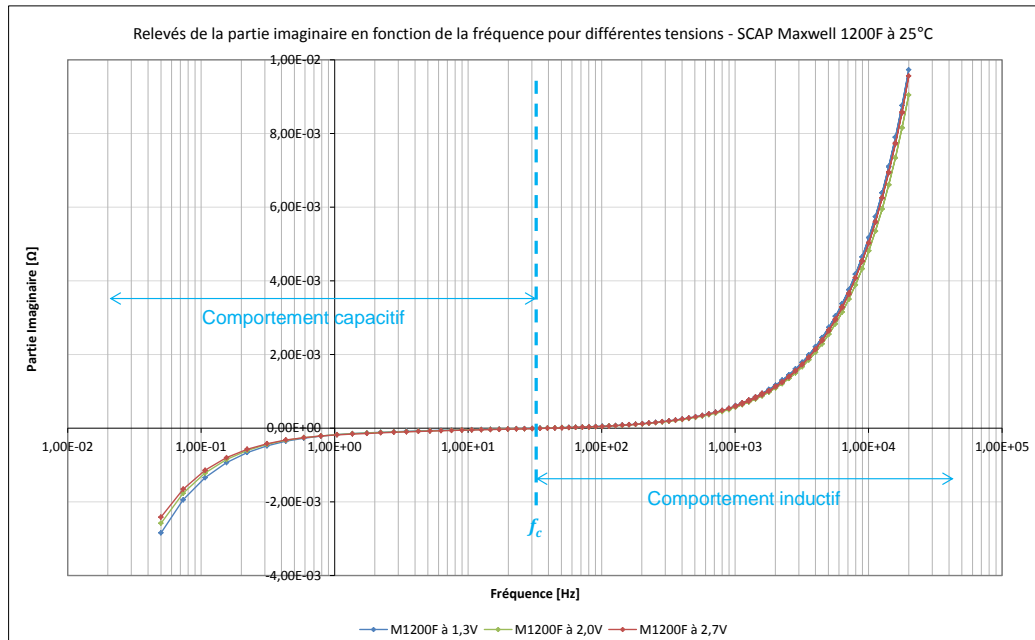


FIGURE III-30 : RELEVES DE LA PARTIE IMAGINAIRE EN FONCTION DE LA FREQUENCE A 25°C ET A DIFFERENTES TENSIONS – SCAP M1200F

Comportement inductif – L’inductance L_{f2} est déterminée en appliquant la relation III-12. Pour un supercondensateur Maxwell 1200F à 25°C, l’inductance est relativement constante et vaut 80nH. De manière générale, l’inductance mesurée pour tous les composants est de l’ordre de quelques dizaines de nano-Henry, quelles que soient les conditions expérimentales (en tension et en température).

Comportement capacitif – On peut déduire de la partie imaginaire l’évolution de la capacité en fonction de la fréquence grâce à la relation III-22, en considérant que l’inductance L_{f2} est constante sur la plage de fréquence concernée. L’évolution de la capacité en fonction de la fréquence, pour trois tensions et à 25°C, est donnée en Figure III-31.

$$C(\omega) = \frac{1}{\omega(L_{f2} \cdot \omega - Im_{BF}(Z))} \quad \text{III-22}$$

Avec : $Im_{BF}(Z)$: partie imaginaire [Ω] de l’impédance complexe (en basses fréquences)

On note que la capacité à basse fréquence est fonction de la tension aux bornes du composant, conformément aux observations relevées au paragraphe III.3.4. Pour une fréquence de l’ordre de 1Hz, la capacité converge quelle que soit la tension de polarisation, avant de tendre vers zéro à la fréquence $f_{0_{sc}}$.

De même que pour la résistance à basses fréquences, la capacité à basses fréquences C_{BF} obtenue à partir de la partie imaginaire, peut être assimilée à la capacité C_{SC} déterminée dans le modèle standard. Une comparaison de la capacité C_{BF} mesurée par SIE et de la capacité C_{SC} du modèle standard est proposée dans le Tableau III-9. Les valeurs de capacité mesurées sont du même ordre de grandeurs et supérieures à la capacité indiquée par les constructeurs.

| SCAP 1200F | Datasheets à 25°C | Résultats issus des expérimentations à 25°C | |
|------------|-------------------|---|-----------------|
| Paramètres | C | C _{sc} | C _{BF} |
| Unité | [F] | [F] | [F] |
| Maxwell | 1200 | 1305 | 1320 |
| Batscap | 1200 | 1251 | 1240 |

TABLEAU III-9 : COMPARAISON DES CAPACITES BF – DATASHEETS, ESSAIS DC ET SIE – SCAP 1200F

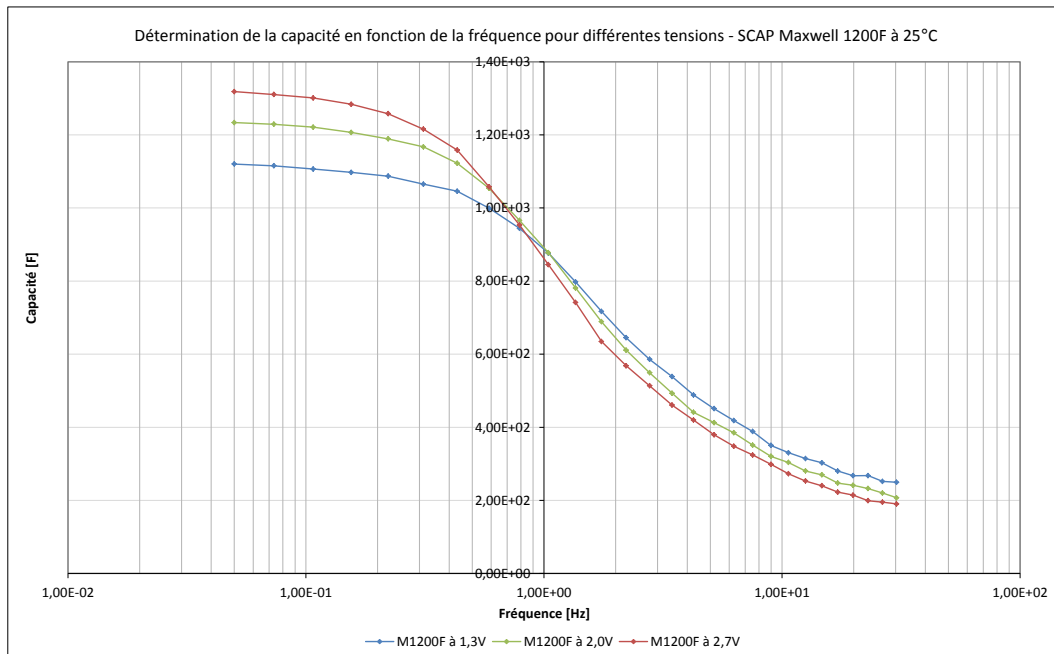


FIGURE III-31 : DETERMINATION DE LA CAPACITE EN FONCTION DE LA FREQUENCE POUR DIFFERENTES TENSIONS – SCAP M1200F

Comme on peut l’observer sur la Figure III-31, la capacité en basse fréquence (< 100mHz) mesurée par SIE varie en fonction de la tension aux bornes du composant. Son évolution est assez linéaire et peut être exprimée, en première approximation, par la fonction affine suivante :

$$C_{BF}(U) = C_0 + K' \cdot U \tag{III-23}$$

Avec : C₀ : capacité composante de C_{BF}, indépendante de la tension à ses bornes [F]
 K' : coefficient de proportionnalité entre composante de C_{BF} et la tension à ses bornes [F.V⁻¹]

Une comparaison des paramètres obtenus par SIE avec ceux du modèle à deux branches (Cf. § III.3.4) est présentée dans le Tableau III-10. Les paramètres C_{i0} et C₀ sont équivalents, ils représentent la capacité du composant lorsque la tension à ses bornes est nulle. L’écart est plus important entre les paramètres K et K' qui représentent la pente de l’évolution de la capacité avec la tension. Cet écart est certainement dû à la méthode d’essai : autour d’une tension constante pour la SIE, à tension variable pour la charge par créneau de courant.

| SCAP 1200F | Résultats issus des expérimentations à 25°C | | | |
|------------|---|----------------------|----------------|----------------------|
| | Essai par créneau de courant | | Essai par SIE | |
| Paramètres | C _{i0} | K | C ₀ | K' |
| Unité | [F] | [F.V ⁻¹] | [F] | [F.V ⁻¹] |
| Maxwell | 960 | 200 | 938 | 143 |
| Batscap | 980 | 180 | 931 | 114 |

TABLEAU III-10 : COMPARAISON DES CAPACITES – MODELE A DEUX BRANCHES R-C ET PARAMETRES OBTENUS PAR SIE – SCAP1200F

Pour compléter cette analyse de la partie imaginaire, l'influence de la température sur la capacité est observée. Sur la Figure III-32, est présentée l'évolution de la capacité en fonction de la fréquence, à différentes températures, pour une tension de 2,7V sur un composant Maxwell 1200F. A basses fréquences, la variation de la capacité due à la température est faible (inférieure à 50F). En revanche, pour des fréquences supérieures à 0,1Hz, l'évolution de la capacité en fonction de la température est plus sensible. Par exemple, on relève à 1Hz une capacité de 900F à 55°C et une capacité de 640F à -20°C, soit un écart de 20%.

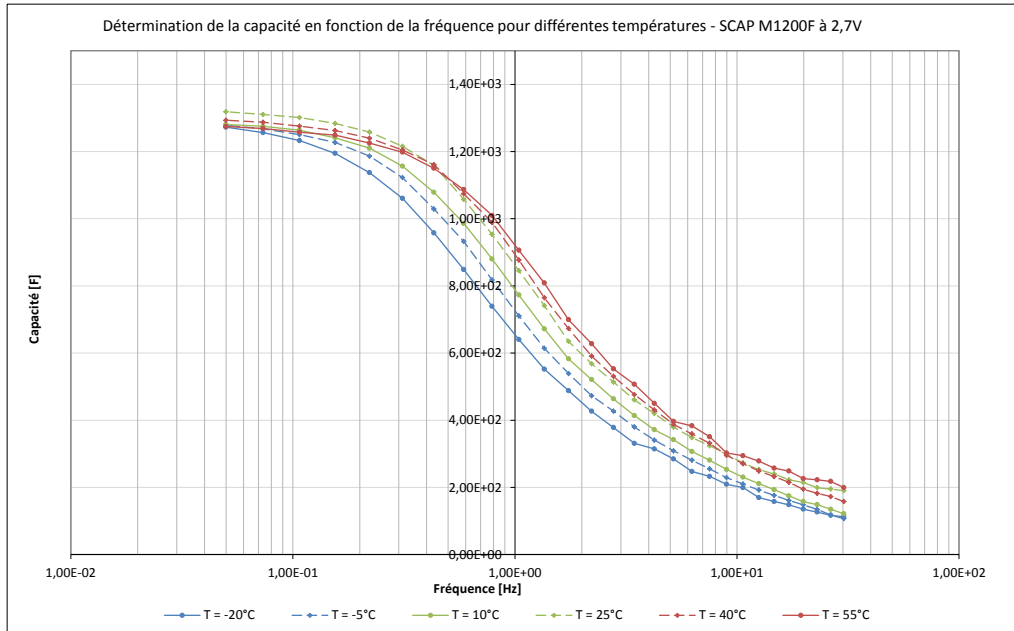


FIGURE III-32 : DETERMINATION DE LA CAPACITE EN FONCTION DE LA FREQUENCE POUR DIFFERENTES TEMPERATURES – SCAP M1200F

Sur la Figure III-33, est présentée l'évolution de la capacité à basses fréquences C_{BF} en fonction de la tension, à différentes températures, pour un composant Batscap 1200F. On note sur cette figure que la capacité C_{BF} varie peu en fonction de la température (la variation est de l'ordre de 20F, soit moins de 2%).

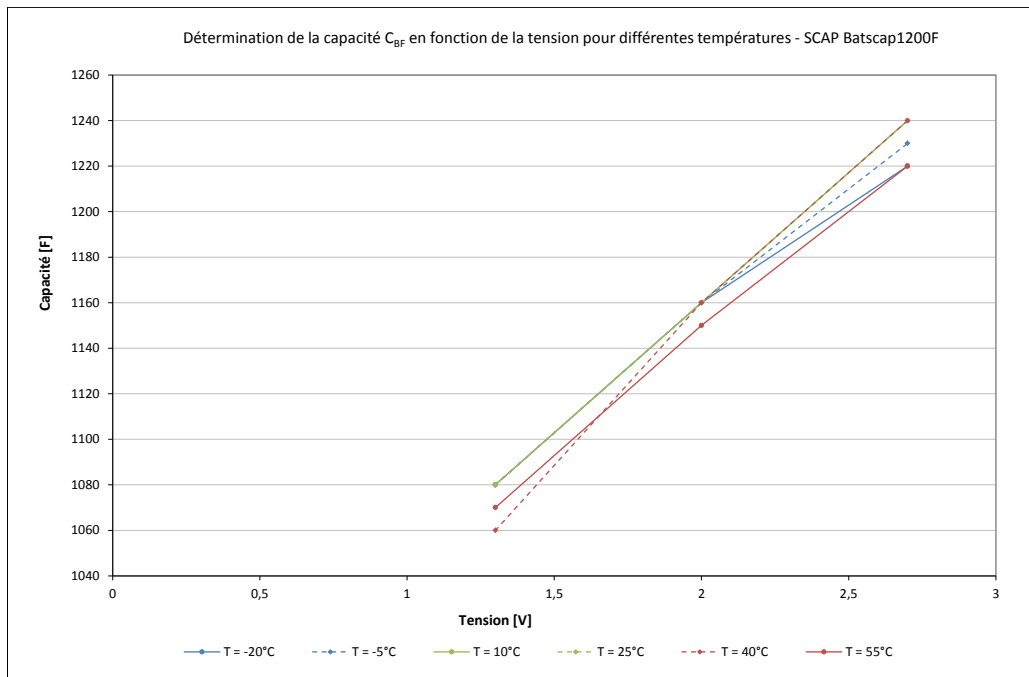


FIGURE III-33 : DETERMINATION DE LA CAPACITE BF EN FONCTION DE LA TENSION POUR DIFFERENTES TEMPERATURES – SCAP B1200F

Ces deux graphiques montrent et confirment au vu des précédents résultats d'essais que la température influence assez peu la valeur de la capacité à basses fréquences C_{BF} d'un supercondensateur, quelle que soit la tension à ses bornes.

4.4.2 SIMULATION DU MODELE DYNAMIQUE

Les résultats de simulation du modèle dynamique sont présentés dans ce paragraphe. Tout d'abord, les spectres obtenus par simulation du modèle avec Matlab® sont comparés avec les spectres issus de la SIE. Puis le modèle dynamique est simulé dans le domaine temporel et comparé aux modèles standard et à deux branches R-C.

En Figure III-34, sont présentés les résultats de simulation du modèle dynamique pour le supercondensateur M650F à 25°C et à 2,7V dont les paramètres sont synthétisés dans le Tableau III-11.

| Paramètre | L_{f2} | R_{HF} | C_{BF} | R_{BF} | R_n | C_n |
|-----------|----------|----------|----------|----------|--|------------|
| Unité | [nH] | [mΩ] | [F] | [mΩ] | [mΩ] | [F] |
| Valeur | 10 | 0,79 | 673 | 1,3 | $6(R_{BF} - R_{HF})/(n^2 \cdot \pi^2)$ | $C_{BF}/2$ |

TABLEAU III-11 : PARAMETRES DU MODELE DYNAMIQUE IDENTIFIES A PARTIR D'UNE SIE A 25°C ET A 2,7V – SCAP M650F

La simulation a été effectuée avec plusieurs valeurs de n pour modéliser la ligne de transmission. Par exemple, la simulation du modèle avec un seul circuit R-C tel que envisagé en première approximation (Cf. Figure III-21), donne des résultats peu satisfaisants en termes de précision : l'écart entre modèle et mesure est de 6% sur la partie imaginaire et de 16% sur la partie réelle. On constate que plus le nombre de circuits R-C est élevé, plus le modèle tend vers la mesure. Dans le souci d'implanter facilement le modèle, on cherche à limiter le nombre de circuits, tout en respectant une précision inférieure à 5%. Ce niveau de précision est atteint sur pour n=4, sur la zone des moyennes fréquences (MF). En revanche, quel que soit le nombre de circuits, il existe toujours le même écart à basses fréquences car l'impédance n'est pas purement capacitive.

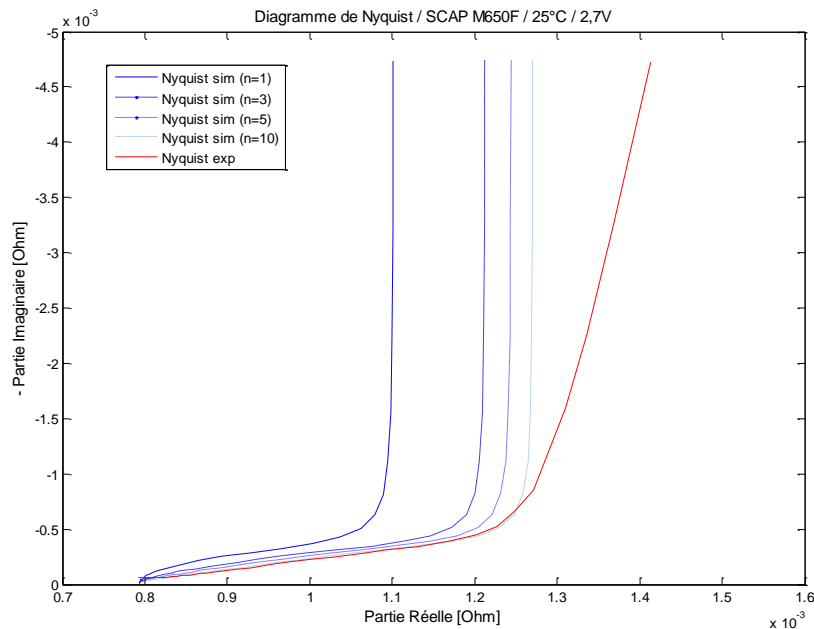


FIGURE III-34 : COMPARAISON DES SPECTRES D'IMPEDANCE SCAP M650F A 25°C ET 2,7V – INFLUENCE DU NOMBRE DE CIRCUITS R-C

On étudie alors la possibilité d'ajouter à l'impédance harmonique de la ligne de transmission un circuit multi R-C représentant le phénomène de redistribution (BF). Pour cela, on simule un modèle composé de la résistance

R_{HF} en série avec l'impédance de la ligne de transmission (C_{BF} en série avec n circuits R-C, ici n=4) et m circuits R-C pour représenter les phénomènes à basses fréquences. En Figure III-35, sont donnés les résultats de la simulation du modèle dynamique pour trois valeurs pour m. Pour m=2, l'écart entre le modèle et la mesure est inférieur à 5%, y compris en basses fréquences.

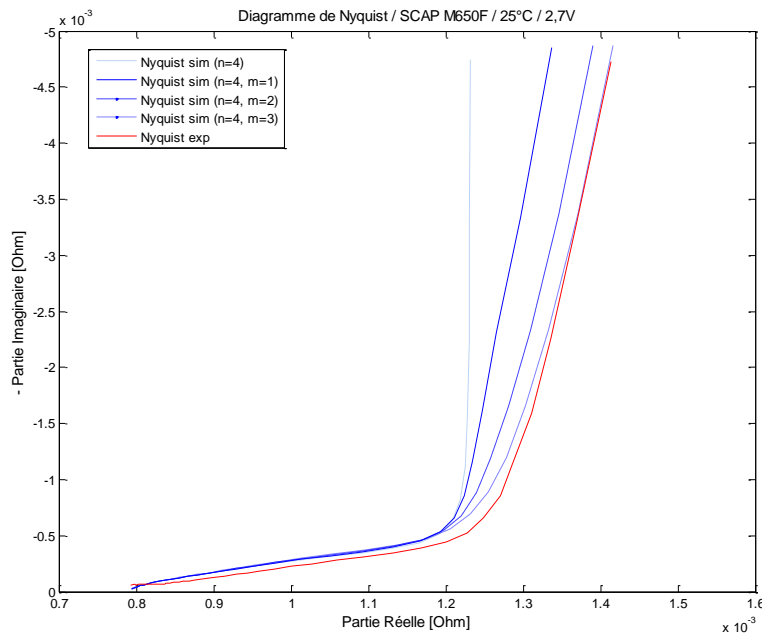


FIGURE III-35 : COMPARAISON DES SPECTRES D'IMPEDANCE SCAP M650F A 25°C ET 2,7V – MODELISATION DES PHENOMENES BF

Enfin, le modèle dynamique donné en Figure III-36 est simulé dans le domaine temporel afin d'évaluer son comportement et de le comparer aux autres modèles. Un synoptique du modèle dynamique tel qu'il est implanté dans Matlab® Simulink est donné en Figure III-37.

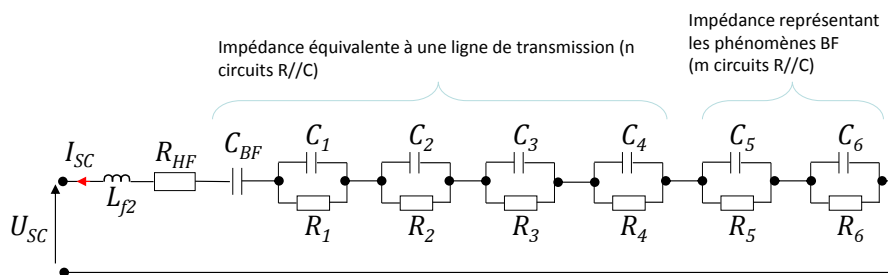


FIGURE III-36 : MODELE DYNAMIQUE D'UN SUPERCONDENSATEUR

Les résultats de la simulation du modèle dynamique dans le domaine temporel sont donnés en Figure III-38. Il s'agit de la réponse en tension du modèle dynamique à une sollicitation en courant du type décharge par paliers de courant, dont l'amplitude est croissante. L'évolution de la tension est comparée à la tension obtenue par simulation des modèles standard et à deux branches R-C et à la tension relevée expérimentalement.

Les résultats de simulation sont satisfaisants dans le sens où l'écart relatif entre les différents modèles et la mesure est faible (Cf. Figure III-39). On note que l'écart est le plus faible pour le modèle dynamique (inférieur à 4%), particulièrement lors de l'application du dernier créneau de courant (à plus forte amplitude). En effet, l'impédance complexe du modèle dynamique traduit mieux le comportement du composant en transitoire que les résistances des deux autres modèles.

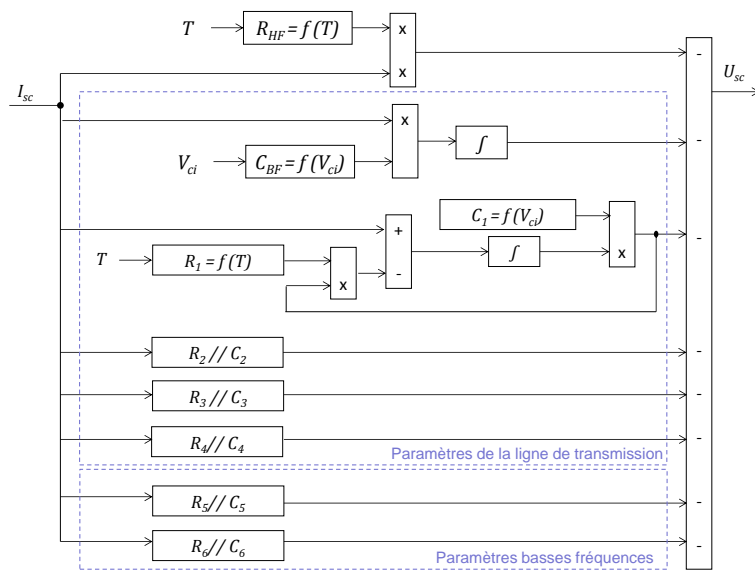


FIGURE III-37 : SYNOPTIQUE DU MODELE DYNAMIQUE SOUS MATLAB SIMULINK

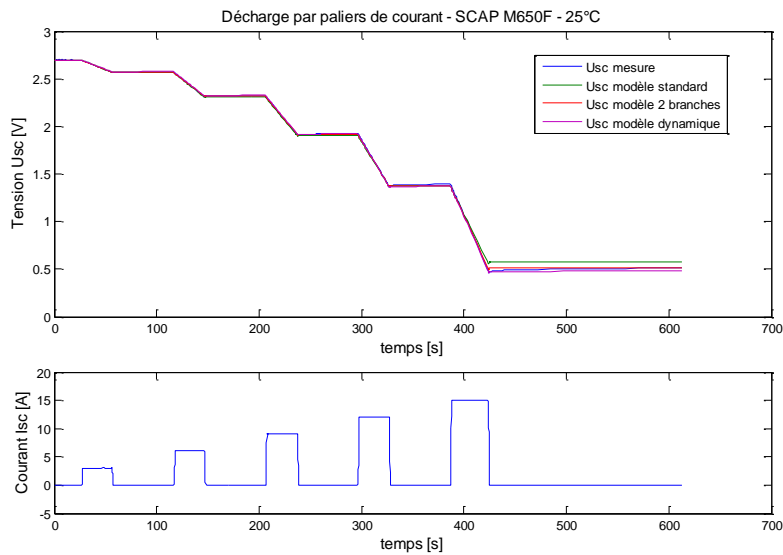


FIGURE III-38 : SIMULATION DES MODELES STANDARD, A 2 BRANCHES R-C ET DYNAMIQUE EN COMPARAISON DES MESURES

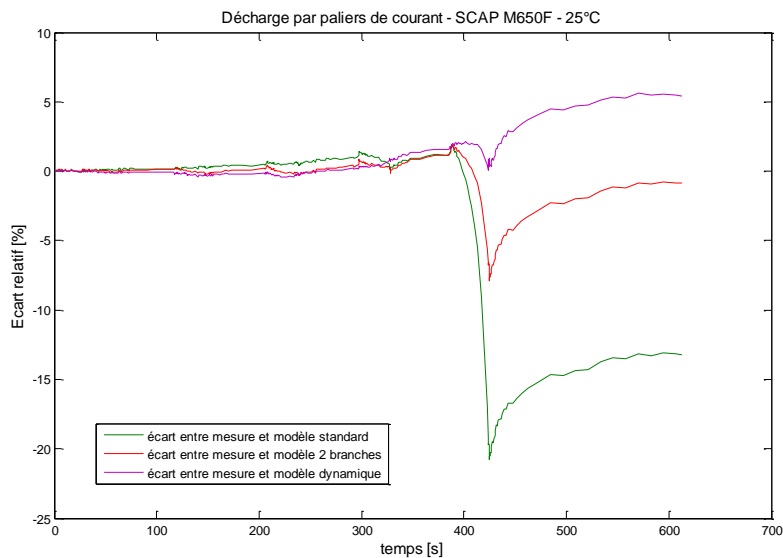


FIGURE III-39 : COMPARAISON DES ECARTS ENTRE LES MODELES ET L'EXPERIMENTATION

Pour conclure, un modèle dynamique a été proposé pour représenter au mieux le comportement fréquentiel des supercondensateurs. Ce modèle est issu d'un compromis entre la précision attendue du modèle (sur toute la plage de fréquence) et le souci de son implantation dans l'optique d'une simulation dans le domaine temporel.

5 CONCLUSION SUR LES CARACTERISATIONS ET MODELISATIONS DES SUPERCONDENSATEURS

Dans ce chapitre III, trois modèles ont été développés pour représenter le comportement électrique de cellules de supercondensateurs. Pour chacun de ces modèles, un essai a été proposé, permettant l'identification de ses paramètres.

Dans un premier temps, le modèle standard a été présenté. Il s'agit d'un modèle simple, normalisé et utilisé par les constructeurs pour rédiger leurs fiches techniques. L'avantage de ce modèle est l'identification aisée de ses paramètres à partir d'un essai de charge/décharge à courant constant. La simulation de ce modèle en comparaison avec les relevés expérimentaux a mis en exergue les limites de ce modèle, notamment le fait que l'évolution de la capacité en fonction de la tension ne soit pas prise en compte.

Un second modèle fonctionnel a alors été développé pour intégrer l'influence de la tension sur la valeur de la capacité des supercondensateurs. Ce modèle, issu du modèle de Zubieta & Bonert, est composé de deux branches R-C : la première représente la capacité de stockage du composant et sa résistance interne ; la seconde branche représente le phénomène de redistribution des charges ou relaxation observé en fin de charge ou de décharge. L'intérêt de ce modèle est la prise en compte de la variation de la capacité en fonction de la tension. Celle-ci est facile à évaluer à partir d'un essai de type charge/décharge à fort courant. L'autre intérêt de ce modèle réside dans sa deuxième branche, représentant des phénomènes basses fréquences intervenant après une sollicitation électrique du composant. Cet aspect est néanmoins plus difficile à mesurer (car les courants associés à ces phénomènes sont faibles) et par conséquent à modéliser.

Les deux modèles fonctionnels (modèle standard et modèle à deux branches R-C) présentent l'inconvénient de décrire assez mal le comportement des supercondensateurs dans les phases transitoires. Un modèle dynamique a donc été étudié, intégrant une impédance complexe pour représenter au mieux le comportement fréquentiel du composant. Ce modèle nécessite une caractérisation adaptée, sur une large plage de fréquence. L'essai préconisé pour identifier les paramètres de ce modèle est une spectrométrie d'impédance, soit un essai à « petits signaux ». D'ailleurs, cette méthodologie s'avère être plus précise pour la mesure de résistance que les méthodes à forts courants. En revanche, l'inconvénient du modèle dynamique peut être la complexité de son implantation. En effet, la précision du modèle conduit à multiplier les branches R-C pour le faire tendre vers les mesures, ce qui pose problème rapidement dès que l'on veut simuler son fonctionnement dans le domaine temporel. Enfin, le modèle dynamique tel que présenté dans cette étude, c'est-à-dire intégrant une ligne de transmission, montre ses limites en basses fréquences, où le comportement du supercondensateur n'est pas purement capacitif. Cependant, compte-tenu de son application finale, ce modèle peut convenir avec un nombre fini et faible de branches R-C.

Pour mener à bien la modélisation des supercondensateurs, des essais de caractérisation ont été définis pour chacun des modèles. Au vu des comparaisons entre ces trois modèles et les relevés expérimentaux, il apparaît que les résultats sont assez cohérents bien qu'ils aient été obtenus par des méthodes d'essais différentes (charge/décharge à courant fort ou spectrométrie par petits signaux). Il est donc important de considérer ces caractérisations comme étant complémentaires les unes des autres. Par exemple, l'évolution de la capacité en fonction de la tension peut être définie lors d'un essai en décharge à courant constant ou par SIE autour de plusieurs tensions d'équilibre. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont assez proches mais on privilégiera l'essai à courant fort pour évaluer l'influence de la tension sur la capacité, pour deux raisons : cet

essai à courant fort est proche des conditions réelles dans lesquelles le composant sera exploité ; de plus, le temps d'essai est relativement élevé pour réaliser plusieurs spectrométries successives et établir la loi de variation que l'on obtient grâce à un seul essai à fort courant (le temps d'essai pour les SIE est de l'ordre de l'heure, tandis qu'il est de l'ordre de la minute pour une décharge à courant constant). Autre exemple pour la détermination de la résistance interne du composant. La mesure par SIE est plus précise et permet aisément de distinguer les différentes résistances et impédances qui traduisent le comportement électrique des supercondensateurs. La résistance interne mesurée par les méthodes à fort courant peut englober plusieurs résistances, cela dépend des moyens d'acquisition des mesures : si le matériel d'acquisition est performant, la résistance mesurée peut être assimilée à la résistance HF. *A contrario*, si la période d'échantillonnage est grande devant la constante de temps du phénomène d'accessibilité des pores par exemple, la résistance mesurée est la somme de la résistance HF et de la résistance ionique (dont la valeur dépend de la fréquence à laquelle elle est mesurée). Bref, la mise en parallèle des résultats selon les différentes méthodes met en évidence leur complémentarité.

Enfin, cette série de caractérisations a permis de tirer un certain nombre d'enseignements sur le comportement électrique et physique des supercondensateurs, notamment en fonction de la température. On a pu noter que la température a une influence sur la résistance interne des modèles fonctionnels et sur l'impédance du modèle dynamique. On a également pu observer que la capacité n'est pas (ou l'est de manière négligeable à basses fréquences) impactée par la température ambiante des composants.

Les caractérisations ont été effectuées sur plusieurs supercondensateurs, de diverses capacités nominales et fournies par deux fabricants. Plusieurs grandeurs indiquées sur les fiches techniques des constructeurs ont pu être vérifiées ou confrontées lors de cette étude. En outre, une importante base de données expérimentales a été établie, ainsi qu'une bibliothèque de modèles associés, celle-ci pouvant être exploitée par la suite dans le cadre de simulation de la poutre complète (voir les travaux de Bienaimé [73], [74] et Asensio-Sauto [75]) ou dans des études de dimensionnement (Cf. chapitre V).

Dans ce chapitre, les caractérisations réalisées sur les supercondensateurs ont conduit à l'établissement de modèles de différents niveaux. La comparaison des résultats de simulation de ces modèles et des relevés expérimentaux ont mis en évidence leur cohérence et la complémentarité des essais. Cette étude a également permis d'appréhender le comportement électrique et physique de cellules de supercondensateurs, dans le contexte d'une application aéronautique. La validation de ces modèles sur des profils de charge issus de l'Application est l'étape suivante dans le processus de modélisation. La validation des modèles de supercondensateurs fait l'objet du chapitre IV.

IV. CHAPITRE 4 : VALIDATION DE LA MODELISATION

La validation des modèles établis dans les chapitres II et III est réalisée sur des profils de courant issus de l'Application. La première étape dans ce chapitre consiste à définir ces profils de courant pour chacun des éléments de stockage. Pour cela, l'architecture détaillée de la poutre électrique est tout d'abord présentée, ainsi que la stratégie de gestion de l'énergie définie pour la poutre électrique. Ensuite, à partir d'un profil de mission typique pour un aéronef, un profil des charges connectées sur les deux bus est établi. La gestion d'énergie ayant pour rôle de répartir les appels de puissance des charges entre les diverses sources en présence, sa mise en œuvre permet de déterminer les profils de courant demandés à chaque source et particulièrement aux éléments de stockage. La deuxième étape de ce chapitre est la validation des modèles d'accumulateur et de supercondensateur. Pour ce faire, des essais sont effectués en appliquant aux éléments de stockage les profils de courant déterminés dans la première partie et liés à l'Application. Enfin les résultats expérimentaux sont comparés aux résultats de simulation des modèles précédemment définis.

1 GESTION DE L'ENERGIE DANS LA POUTRE ELECTRIQUE

Dans ce paragraphe, l'architecture électrique de la poutre est détaillée. Ensuite une représentation de celle-ci est proposée, permettant la structuration de son modèle et la mise en évidence des paramètres de réglage. Enfin, les principes de la gestion de l'énergie appliquée à cette poutre sont exposés. Ce travail a été mené conjointement avec D. Bienaimé [45] dans le cadre du Projet.

1.1 ARCHITECTURE DE LA POUTRE ELECTRIQUE

Le schéma structurel de la poutre électrique ci-après (Cf. Figure IV-1) est déduit de l'architecture étudiée dans le Projet, donnée en Figure I-23.

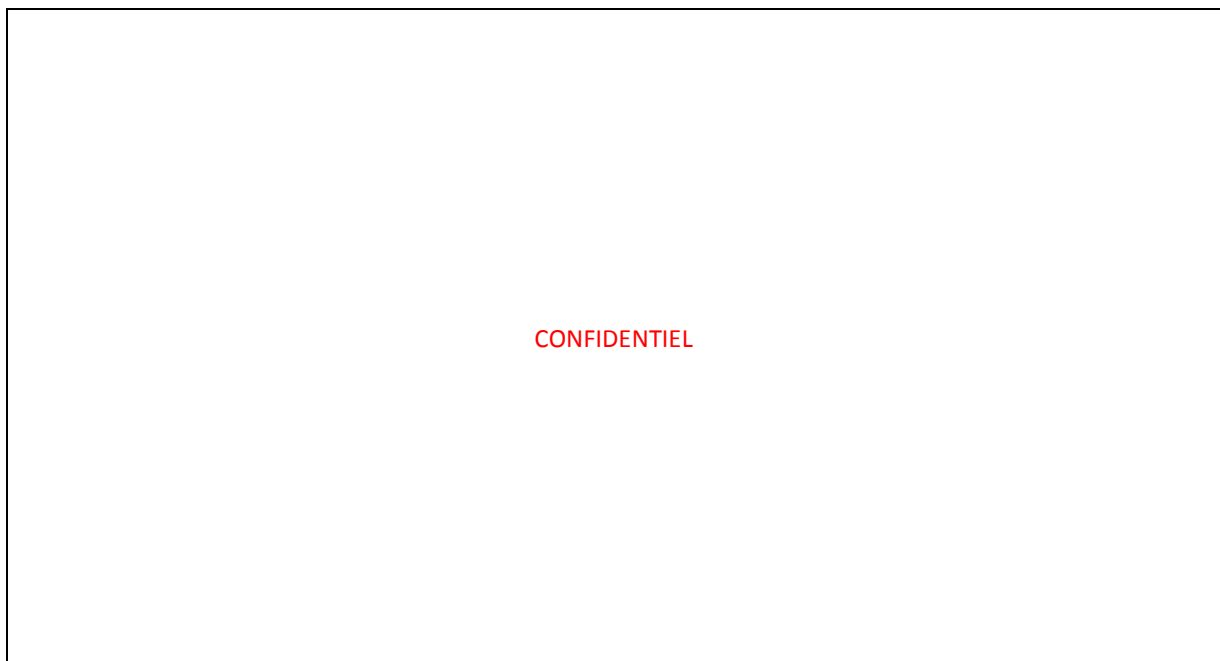


FIGURE IV-1 : SCHEMA STRUCTUREL DE LA POUTRE ELECTRIQUE

CONFIDENTIEL

1.2 MODELISATION DE LA POUTRE ELECTRIQUE

La poutre électrique, telle que décrite au paragraphe précédent, est un système relativement complexe intégrant des composants de nature et de domaine différents. Pour organiser la modélisation de cette poutre, il existe diverses méthodologies, parmi lesquelles le Graphe Informationnel Causal (GIC) [76], le Bond Graph [77] ou la Représentation Energétique Macroscopique (REM) [78]. Cette dernière a été retenue pour le Projet car elle est particulièrement adaptée à l'étude de systèmes multi-physiques et multi-échelles. En effet, ce formalisme propose une représentation graphique, synthétique et homogène d'un système complexe. Basée sur les principes d'action/réaction et de causalité intégrale, cette méthodologie permet de structurer la modélisation d'un système et d'identifier ses paramètres de réglage pour en définir ensuite une structure de commande.

En Annexe 7, les principes de la Représentation Energétique Macroscopique sont présentés et les éléments de la représentation (pictogrammes) ainsi que les règles à suivre pour les associer sont décrits. Les éléments principaux, particulièrement ceux qui sont utilisés dans cette application, sont synthétisés dans le Tableau IV-1 et définis ci-après. Une source d'énergie est une source génératrice ou réceptrice, imposant des variables d'état sur un système. Un accumulateur d'énergie est un élément de conversion non instantanée, admettant une causalité intrinsèque et tenant compte de la fonction temporaire de stockage d'énergie. Un convertisseur d'énergie (avec ou sans variable de réglage) est un élément de conversion instantanée assurant une modulation d'une des variables sans prélèvement de puissance et admettant une causalité externe. Un élément de couplage représente la distribution d'un flux de puissance.

La Représentation Energétique Macroscopique de la poutre électrique est donnée en Figure IV-2. Les sources et également les charges sont représentées par des pictogrammes ovales. Les éléments d'accumulation (selfique ou capacitif) sont représentés par des rectangles barrés et les éléments de conversion sont représentés par des rectangles (Cf. Tableau IV-1).



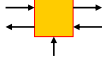
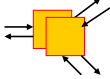
| Elément | Source d'énergie | Accumulateurs d'énergie | Convertisseurs d'énergie (avec variable de réglage) | Couplage (inter-domaine) |
|----------------|---|---|--|---|
| Représentation |  |  |  |  |

TABLEAU IV-1 : ELEMENTS DE LA REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE

Toutes les sources sont considérées comme des sources de courant, vues du bus. Dans de nombreuses architectures de véhicules électriques ou hybrides [3], [54], [55], une des sources est généralement privilégiée et impose sa tension au bus et par conséquent aux autres sources. Dans notre application, aucune source n'est présente en permanence, donc aucune source n'impose sa tension au bus. En effet, les S/G sont par définition des démarreurs (vus comme une charge) avant d'être des générateurs et les éléments de stockage peuvent être déconnectés dans les modes dégradés.

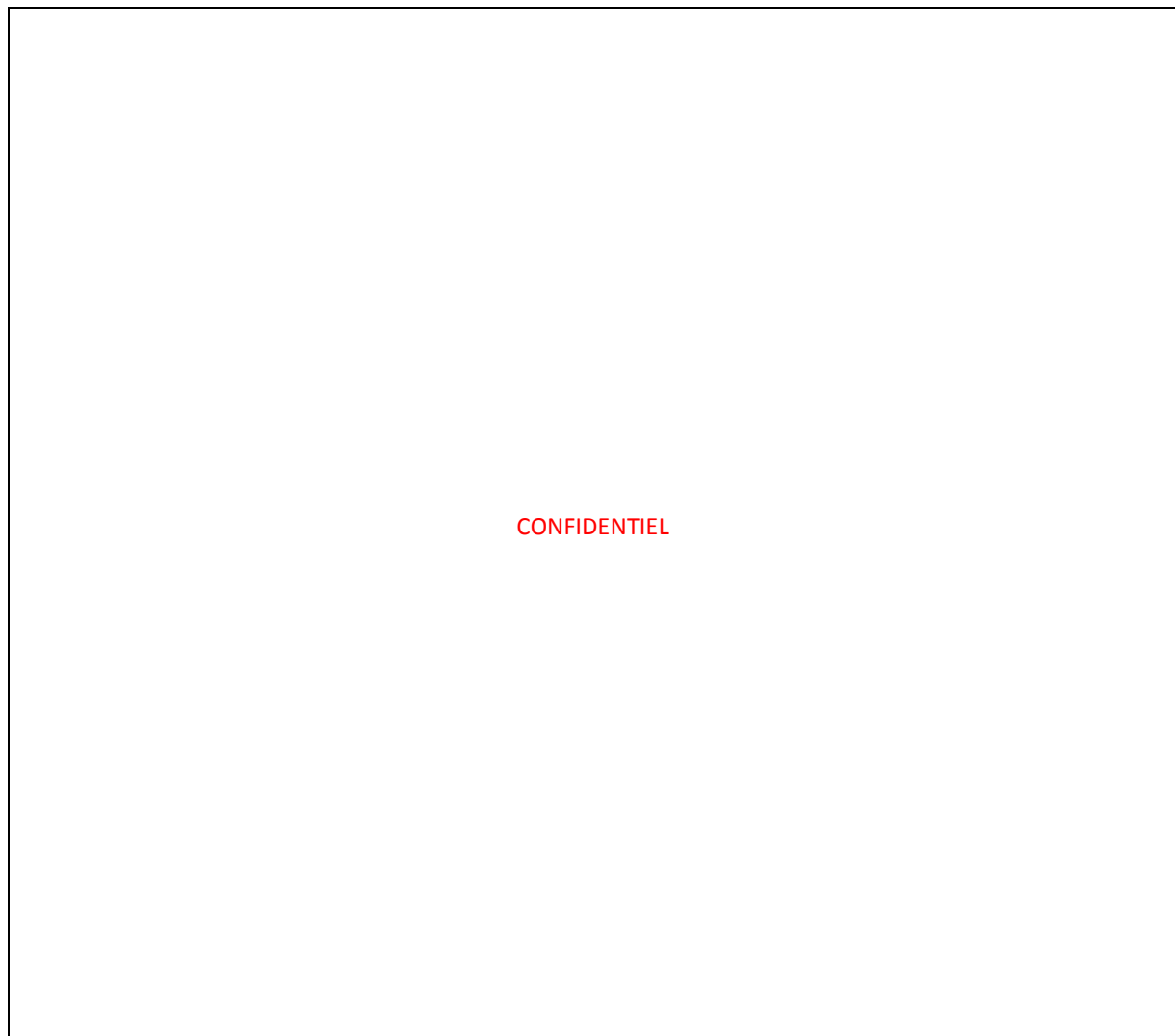


FIGURE IV-2 : REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE DE LA POUTRE ELECTRIQUE

La REM appliquée à la poutre électrique fait apparaître les paramètres de réglage disponibles pour gérer les flux de puissance dans la poutre. Ces paramètres de réglage sont associés aux différents convertisseurs. C'est par action sur ces variables de réglage que l'on va gérer l'énergie dans la poutre.

1.3 GESTION DE L'ÉNERGIE DANS LA POUTRE ELECTRIQUE

De manière générale, la gestion de l'énergie doit garantir la fourniture d'une puissance électrique aux différentes charges à partir des diverses sources en présence, et ce de façon optimale ou la plus adaptée possible en fonction des caractéristiques des sources et en fonction des contraintes électriques sur la poutre.

La gestion de l'énergie, développée par Bienaimé [45] pour le Projet, est une gestion globale dite « en ligne », ce qui signifie que le profil de mission de l'aéronef n'est pas connu *a priori*. La stratégie de gestion de l'énergie consiste donc à mesurer en temps réel l'appel de courant (*i.e.* de puissance) des différentes charges et à le répartir, sous forme de consignes de courant, entre les sources disponibles en fonction de leurs caractéristiques. La stratégie envisagée est basée sur une répartition en fonction de la dynamique des courants admissible par les sources. Ainsi, les Starter/Générateurs (S/G), les batteries d'accumulateurs (ACC) et les packs de supercondensateurs (SCAP) sont sollicités pour fournir des courants à dynamique respectivement lente, moyenne et rapide.

Pour rappel (Cf. paragraphe 1.6), les objectifs de la gestion de l'énergie sont, du point de vue aéronef, la minimisation de la masse embarquée et la limitation du prélèvement sur les turbines, ayant tous deux pour conséquence directe la réduction de la consommation en carburant. Ces objectifs, déclinés à la poutre électrique, sont les suivants :

- réguler les tensions des bus n°1 et n°2
- maîtriser les états de charge des éléments de stockage
- limiter le prélèvement de puissance des générateurs

Les tensions des bus sont régulées autour de références qui peuvent être modifiées par la stratégie de gestion de l'énergie, mais qui sont par défaut constantes. Comme indiqué auparavant, les courants des sources ACC1, SCAP1 et S/G (lorsqu'ils sont en génération) sont régulés autour de références fixées par la gestion d'énergie. La détermination de ces consignes de courant se fait en considérant :

- la configuration ou topologie de la poutre (c'est-à-dire selon les sources en présence)
- les besoins énergétiques de la poutre
- les états de charge des éléments de stockage
- les contraintes liées aux limites technologiques des composants

Pour conclure sur ce paragraphe introductif, l'architecture détaillée de la poutre électrique et sa représentation en vue de sa modélisation ont été présentées. Les paramètres de réglage de la poutre ont été soulignés pour mettre en évidence les leviers nécessaires au contrôle de la poutre et à l'implantation de la gestion d'énergie. Enfin, les principes et les objectifs de la gestion d'énergie ont été exposés.

Après avoir vu dans ce paragraphe le contexte général dans lequel les éléments de stockage s'inscrivent, il est intéressant de voir quels sont les besoins énergétiques de la poutre et comment ils sont répartis au niveau des éléments de stockage.

2 ELABORATION DES PROFILS DE COURANT POUR LES ELEMENTS DE STOCKAGE

Dans le paragraphe précédent, l'architecture électrique de la poutre et sa modélisation ont été présentées. Les principes généraux de la gestion d'énergie mise en œuvre pour la poutre ont également été définis. En synthèse, cette gestion d'énergie en ligne prévoit de répartir les besoins énergétiques de la poutre entre les différentes sources en présence, selon des critères dynamiques. Pour valider par simulation la stratégie élaborée, il est indispensable de disposer d'un profil de charge représentatif d'une mission réelle. De même, pour valider les modèles des SSE, il est intéressant de le faire sur un profil de courant qui découle du profil de mission préalablement défini. Dans un premier temps, l'élaboration des profils de charge de la poutre électrique à partir d'un profil de mission type pour un aéronef est présentée. Puis, le passage des profils de charge aux profils de courant pour les sources et spécifiquement pour les éléments de stockage est expliqué.

2.1 DU PROFIL DE MISSION D'UN AERONEF AU PROFIL DE CHARGE DE LA POUTRE

Un profil de mission est la succession de modes de fonctionnement caractéristiques d'une mission, dans une configuration donnée.

CONFIDENTIEL

Dans le cadre du Projet, plusieurs profils de mission sont imaginés pour couvrir un maximum de cas plausibles pour un aéronef. Deux aspects différencient ces profils de mission : la topologie de la poutre et le scénario d'enchaînement des modes de fonctionnement. D'une part la configuration (ou topologie) de la poutre peut être modifiée volontairement par le pilote ou en cas de défaillance. Ainsi, on répertorie trois configurations : la première est la configuration normale où toutes les sources des deux bus sont disponibles ; les deuxième et troisième configurations correspondent à des modes dégradés, où les éléments de stockage, respectivement du bus n°1 et du bus n°2, sont indisponibles. D'autre part, les scénarii peuvent différer. Ainsi, les modes de fonctionnement peuvent ne pas tous figurer dans une mission ou être enchainés dans des ordres différents. Une analyse des 35 profils de mission identifiés pour le Projet a abouti à un profil de mission type, celui-ci est présenté dans le Tableau IV-2. Ce profil de mission est retenu parce qu'il est le plus complet en termes de scénario et le plus sollicitant pour les éléments de stockage.

CONFIDENTIEL

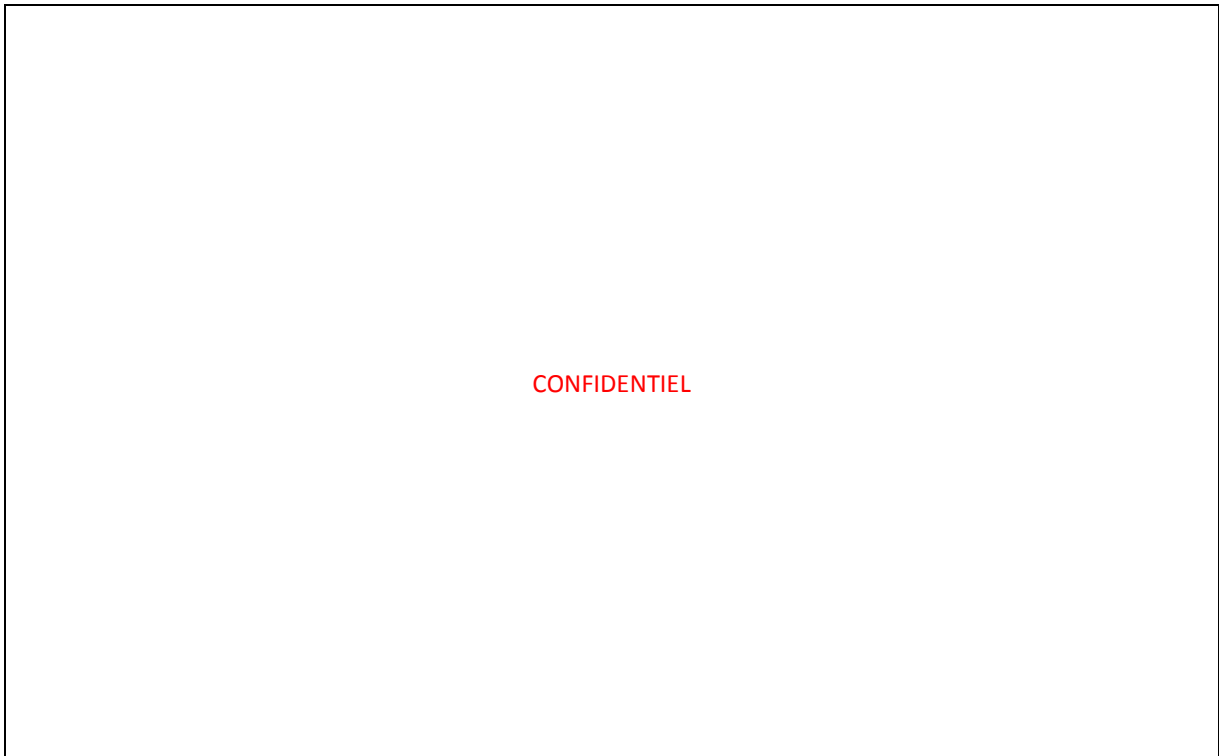


TABLEAU IV-2 : EXEMPLE DE PROFIL DE MISSION TYPE POUR UN AERONEF

A partir de ce profil de mission type, sont élaborés les profils de charge pour les deux bus. Un profil de charge pour un bus est la somme des consommations énergétiques par les organes connectés à ce bus. A chaque mode correspond une liste de charges à activer pendant le mode. De même que le profil de mission est une succession de modes de fonctionnement, le profil de charge est une succession d'activation de charges diverses. Les profils de charge des bus n°1 et n°2, relatifs à ce profil de mission, sont donnés en Figure IV-3.

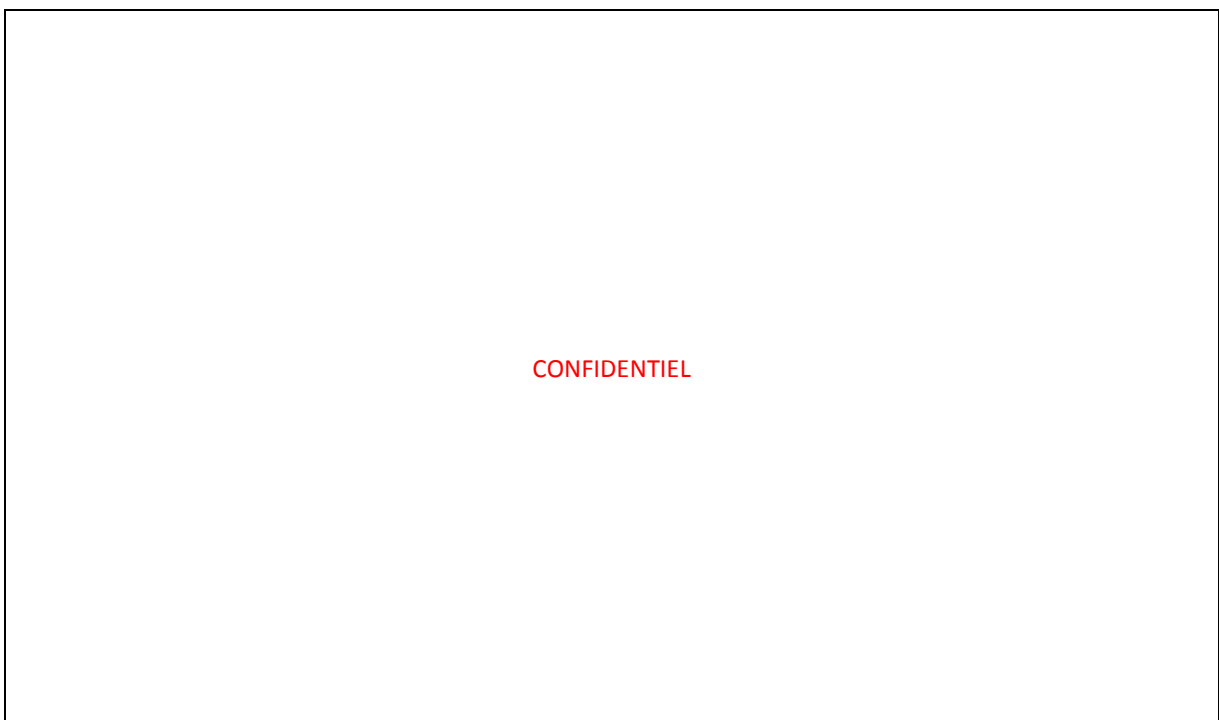


FIGURE IV-3 : PROFIL DE CHARGE DE LA POUTRE ELECTRIQUE

Pour mémoire, on distingue différents types de charge : les charges de fond dont la puissance est quasiment constante dans le temps et les charges spécifiques pour lesquelles le profil de puissance consommée est variable au cours du temps. Les charges du bus n°1 et celles du bus n°2 sont la somme de charges spécifiques et de charges de fond. Une décomposition des charges des bus n°1 et n°2 en charges spécifiques et charges de fond est proposée en Figure IV-4.

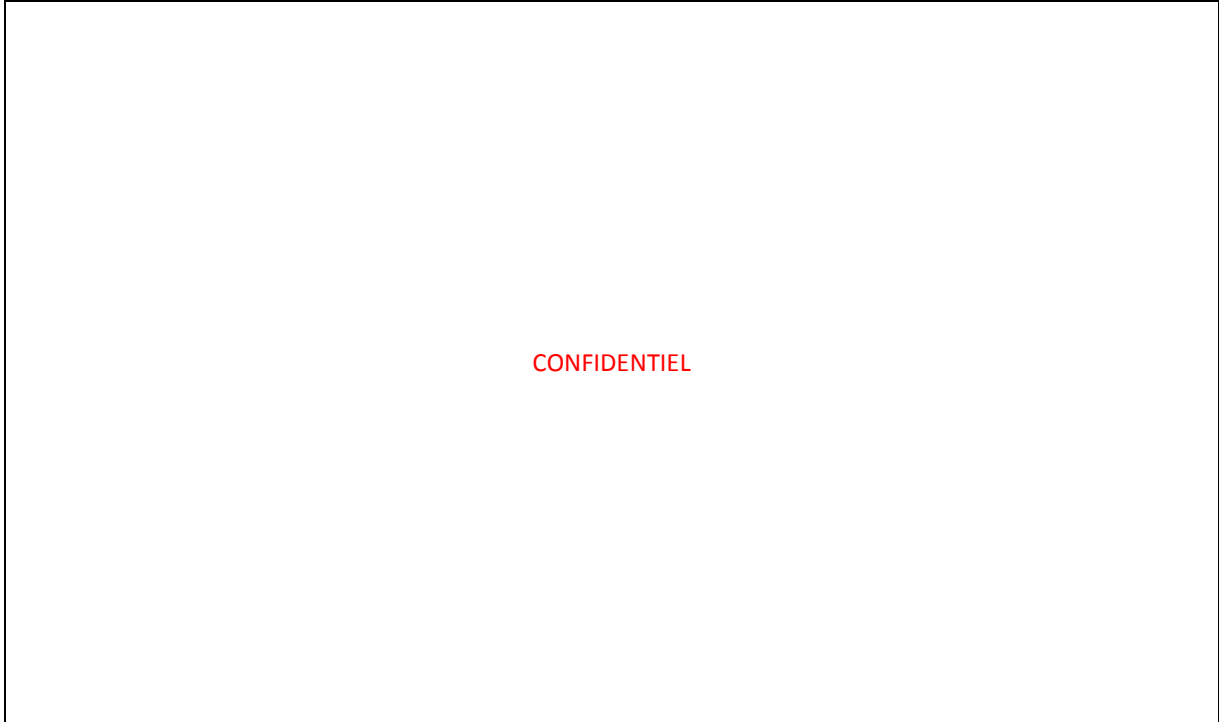
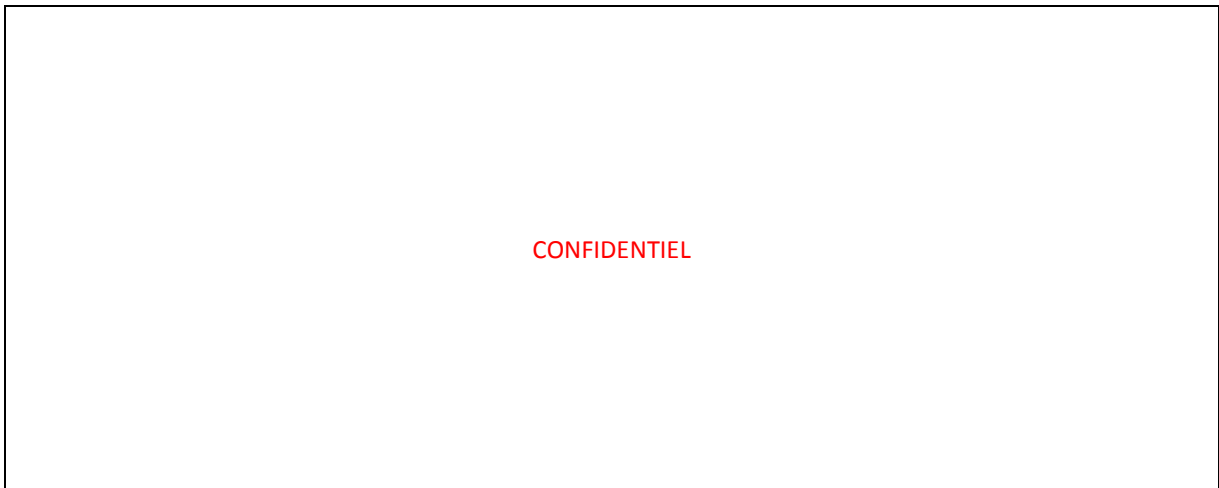


FIGURE IV-4 : PROFILS DES CHARGES SPECIFIQUES ET DE FOND DES BUS N°1 ET N°2



2.2 DU PROFIL DE CHARGE DE LA POUTRE AU PROFIL DE COURANT POUR LES ELEMENTS DE STOCKAGE

Dans ce paragraphe, les profils de courant sont élaborés pour chacune des sources, et particulièrement pour les éléments de stockage, à partir des profils de charges des bus n°1 et n°2 présentés dans le paragraphe précédent. Dans un premier temps, les profils de courant des sources ACC1 et SCAP1 sont établis. Ceux des sources du bus n°2 seront définis dans un second temps.

2.2.1 PROFILS DE COURANT POUR LES SOURCES DU BUS N°1

L'objet de cette partie est de montrer que les profils de courant pour la validation des modèles des sources ACC1 et SCAP1 peuvent être élaborés à partir de la simulation du fonctionnement de la poutre en configuration normale, où les éléments de stockage du bus n°1 sont fortement mis à contribution.

2.2.1.1 COMMANDE DE LA POUTRE EN CONFIGURATION NORMALE

Un des intérêts de la méthodologie REM présentée au paragraphe IV.1.2 est la déduction d'une structure de commande par inversion systématique du modèle (ce procédé est exposé en Annexe 7). Sur la Figure IV-5, une Structure Maximale de Commande (SMC) est proposée pour réguler les tensions des bus en configuration normale. Le régulateur de la tension du bus n°1 est obtenu par l'inversion du condensateur équivalent de ce même bus. Cette régulation minimise l'écart entre la mesure et la référence et définit une consigne en courant (les régulations de tension et de courant sont imbriquées). Les courants de référence des autres sources sont définis par la stratégie de gestion de l'énergie. De la même manière, le régulateur de la tension du bus n°2 est obtenu par l'inversion du condensateur de ce bus.

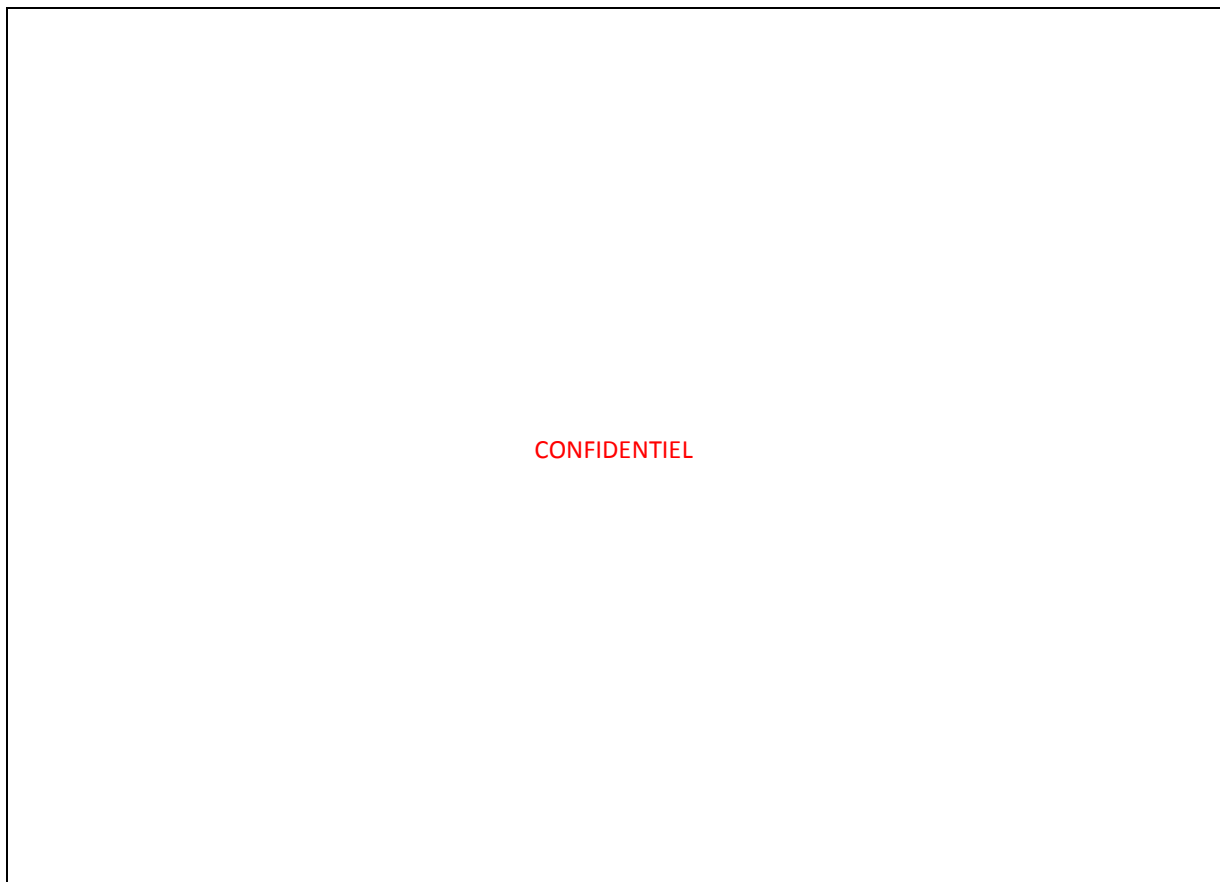


FIGURE IV-5 : REM DE LA POUTRE ET SA STRUCTURE MAXIMALE DE COMMANDE ASSOCIEE (EN CONFIGURATION NORMALE)

CONFIDENTIEL

On note que la régulation de tension du bus n°1 est localisée au plus près de la source la plus dynamique, que sont les supercondensateurs, ce qui va dans le sens d'une meilleure efficacité de la régulation de tension. Les lois de gestion d'énergie fixent alors les références en courant pour les sources du bus n°1 en considérant la régulation de tension réalisée au niveau du convertisseur associé à la source SCAP1. Dans cette configuration, les éléments de stockage du bus n°1 sont particulièrement sollicités. Les profils de courant pour valider les modèles des sources ACC1 et SCAP1 peuvent donc être établis à partir de la simulation du fonctionnement de la poutre en configuration normale.

2.2.1.2 SIMULATION DE LA POUTRE EN CONFIGURATION NORMALE

La modélisation et la simulation de la poutre complète sont réalisées dans le but de valider la stratégie de gestion de l'énergie. Pour atteindre les objectifs de régulation de la tension des bus et de limitation du prélèvement de puissance sur les générateurs, la gestion d'énergie élaborée par Bienaimé [45] répartit l'appel de courant demandé par les charges des deux bus entre les sources en présence selon des critères dynamiques, comme cela est défini au paragraphe IV.1. L'atteinte de ces objectifs implique une sollicitation spécifique des éléments de stockage. Premièrement, pour que la régulation des tensions de bus soit satisfaisante (dans le sens où les variations de tension sont conformes au cahier des charges), la source la plus dynamique, en l'occurrence les supercondensateurs, est particulièrement sollicitée pour fournir la puissance demandée par les charges. Deuxièmement, pour que les variations de puissance demandée aux S/G soient limitées, les accumulateurs sont sollicités pour faire le « tampon » d'énergie entre les supercondensateurs et les générateurs. En effet, les accumulateurs sont sollicités lorsque les variations de puissance demandées par les charges sont trop lentes pour être prises en charge par les supercondensateurs, mais trop rapides pour être assurées par les générateurs.

Une simulation de la poutre électrique est effectuée en configuration normale, sur une mission complète. Les résultats présentés ci-après sont issus des travaux de Bienaimé [45]. L'allure des courants des éléments de stockage du bus n°1 est donnée en Figure IV-6. La simulation de la poutre complète permet la prise en compte des courants de démarrage des S/G, qui ne font pas partie des profils de charge tels que définis dans le paragraphe IV.2.1. La convention utilisée est la suivante : le SSE se décharge quand le courant est positif.

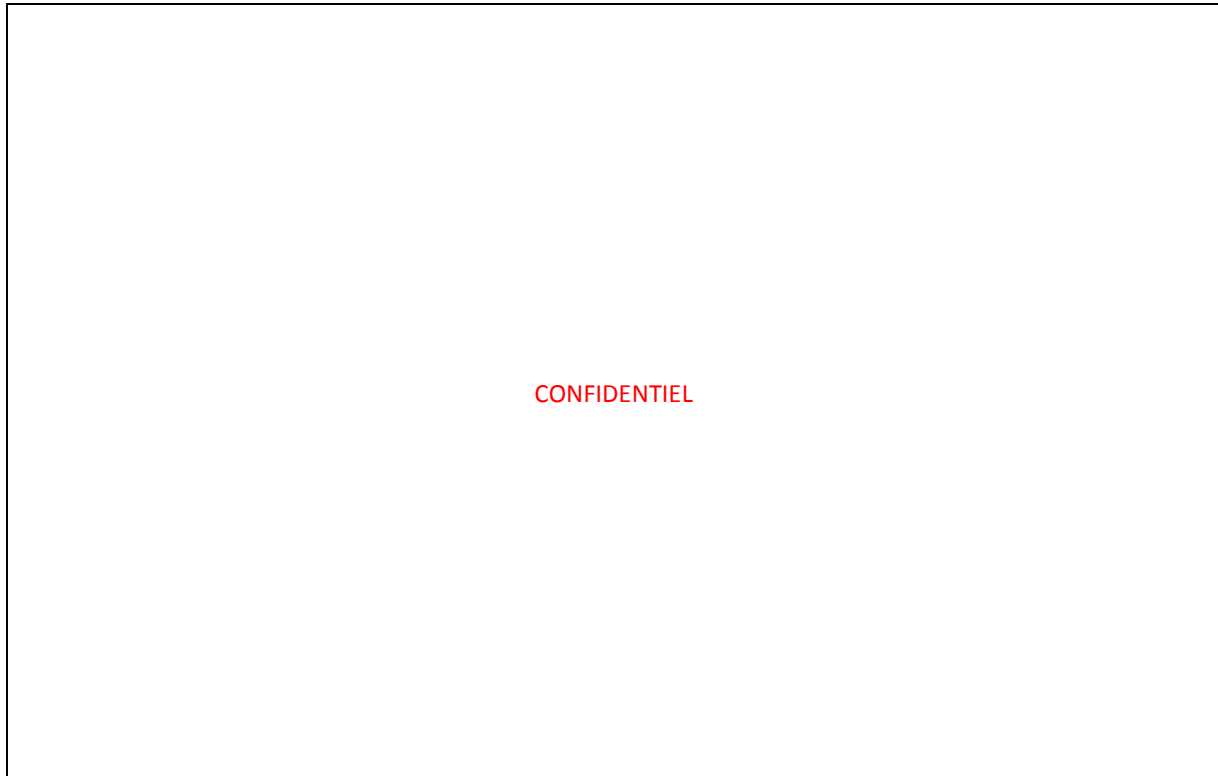


FIGURE IV-6 : SIMULATION DE LA POUTRE ELECTRIQUE – ALLURE DES COURANTS DES SSE DU BUS N°1

Ces résultats de simulation montrent que les supercondensateurs SCAP1 fournissent un courant à dynamique rapide et que la limitation dynamique appliquée aux accumulateurs ACC1 est active. Les SSE du bus n°1 sont donc bien utilisés de manière complémentaire. Ainsi, on peut considérer que les supercondensateurs fournissent la puissance à dynamique rapide demandée par les charges spécifiques et que les accumulateurs (et les S/G lorsqu'ils sont en génération) fournissent la puissance à dynamique moins élevée demandée par les charges de fond.

Les travaux de Bienaimé [45] démontrent que, grâce à une telle sollicitation des sources ACC1 et SCAP1, la régulation du bus n°1 est efficiente. Les variations de tension sont comprises dans l'intervalle de tolérance admis pour la tension du bus n°1.



Le troisième objectif de la gestion d'énergie est le maintien des états de charge des éléments de stockage autour d'une référence. Cette référence doit être assez élevée pour que l'énergie stockée soit suffisante pour compenser l'appel de puissance des charges, mais pas trop élevée de manière à récupérer la puissance excédentaire notamment lors des phases transitoires (typiquement lors de la désactivation d'une charge). La stratégie de gestion de l'énergie développée par Bienaimé [45] prévoit de recharger les supercondensateurs par les accumulateurs, et les accumulateurs par les générateurs.

Des simulations de la poutre, on extrait l'évolution des états de charge des SSE du bus n°1 (Cf. Figure IV-7).

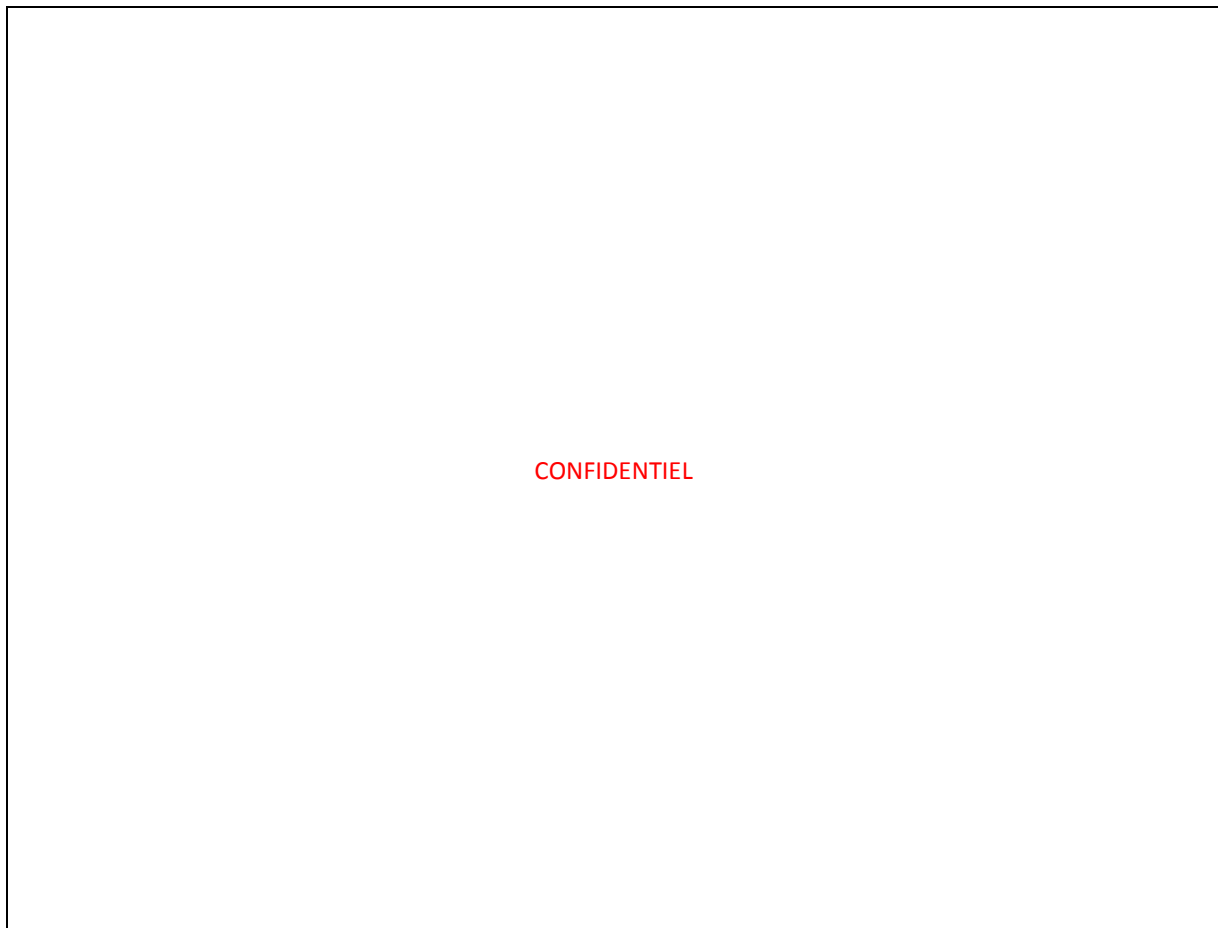


FIGURE IV-7 : SIMULATION DE LA POUTRE ELECTRIQUE – EVOLUTION DES ETATS DE CHARGE DES SSE DU BUS N°1

2.2.1.3 PROFIL DE COURANT POUR LA SOURCE ACC1

Le profil de courant pour la source ACC1 est issu des profils de charge de la poutre, passés par le filtre de la gestion d'énergie. On exploite alors la simulation du fonctionnement de la poutre complète en configuration normale, et particulièrement la consigne de courant demandée à ACC1, pour déterminer un profil de validation des modèles d'accumulateur. Comme cela a été souligné à plusieurs reprises, les SSE sont les seules sources disponibles pendant les vingt premières minutes de la mission, et par la suite ils sont rechargés par les S/G. Le début de mission est très sollicitant en énergie pour la source ACC1, cette période est donc retenue pour établir le profil de courant servant à la validation des modèles. Le profil de courant pendant 20min est ensuite ramené à une cellule et est présenté en Figure IV-8. La capacité équivalente au profil de courant, demandée à une cellule est de 1,6 Ah.

2.2.1.4 PROFIL DE COURANT POUR LA SOURCE SCAP1

Le profil de courant pour les supercondensateurs du bus n°1 est également obtenu en exploitant la simulation du fonctionnement de la poutre complète en configuration normale. L'analyse de la consigne de courant demandée à la source SCAP1 (Cf. Figure IV-6) montre que sa puissance moyenne est nulle ; autrement dit, dès que les supercondensateurs ont fourni un courant et que leur état de charge s'éloigne de la référence, ils sont rechargés par les accumulateurs. Le profil est donc essentiellement un profil en puissance et non en énergie. On retient alors les pics de courant les plus représentatifs pour élaborer le profil de validation des modèles de supercondensateur. Du profil de courant demandé à la source SCAP1, sont extraites les soixante premières

secondes correspondant à la mise sous tension des équipements, et la séquence à partir de 20min correspondant à l'instant où un S/G est en génération et où un grand nombre de charges est activé. Le profil de courant pour valider les modèles de supercondensateur est adapté pour une cellule de 650F et est présenté en Figure IV-9. Le premier pic du profil de courant équivaut à une puissance de 250W pour une cellule.

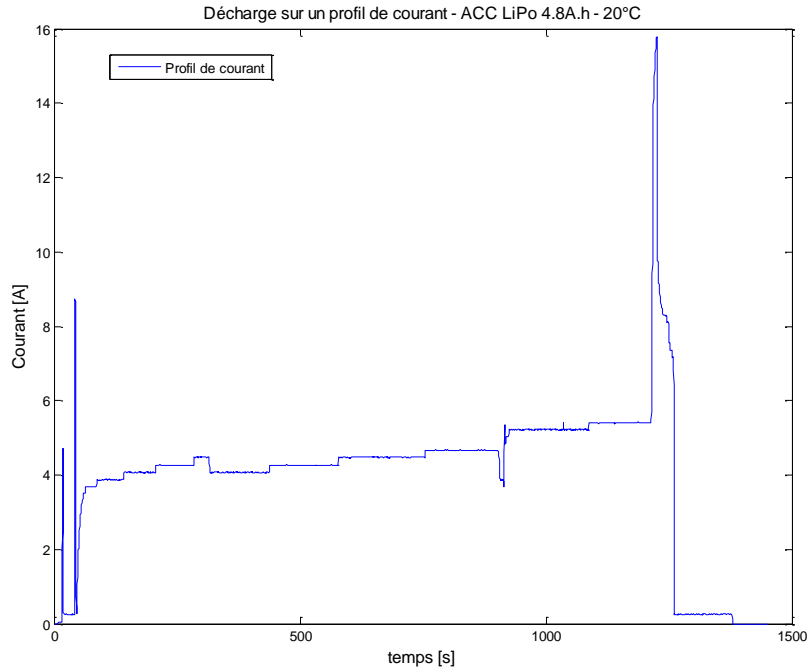


FIGURE IV-8 : PROFIL DE COURANT POUR VALIDATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR LI-ION POLYMERE 4,8 AH

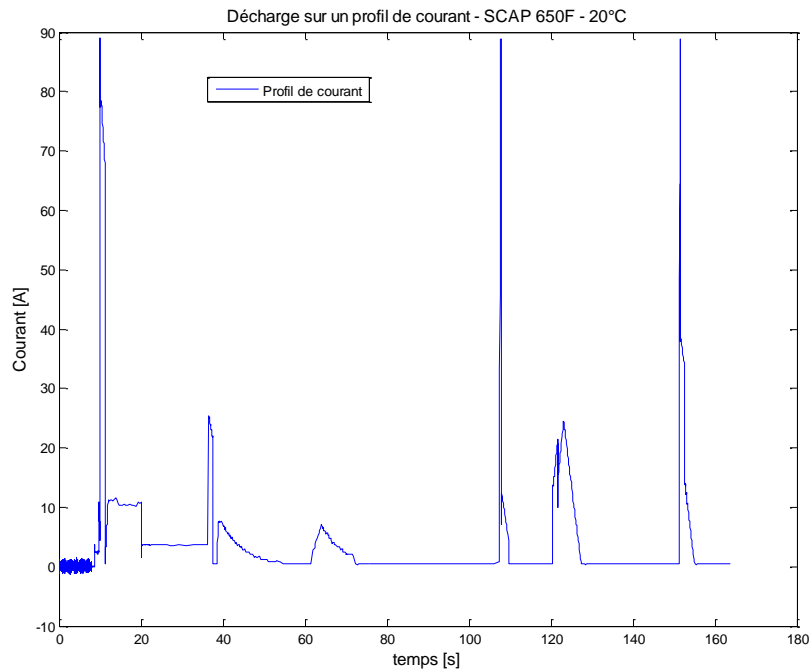


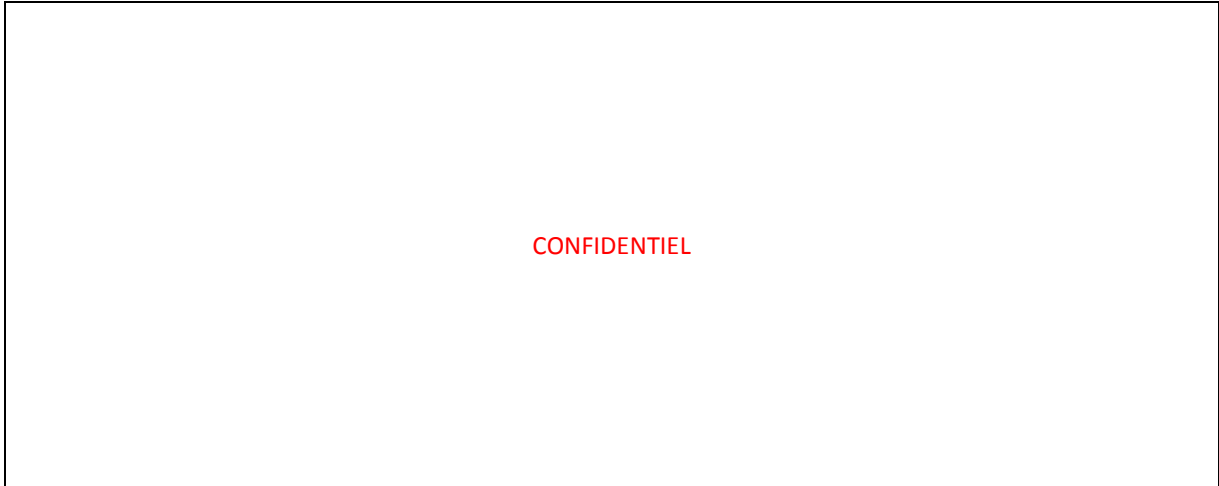
FIGURE IV-9 : PROFIL DE COURANT POUR VALIDATION DES MODELES DE SUPERCONDENSATEUR 650F

Dans cette partie, les profils de courant pour la validation des modèles des sources ACC1 et SCAP1 ont été élaborés à partir de la simulation du fonctionnement de la poutre en configuration normale, où les éléments de stockage du bus n°1 sont fortement mis à contribution, suivant la gestion d'énergie dans la poutre.

2.2.2 PROFILS DE COURANT POUR LES SOURCES DU BUS N°2

L'objet de cette partie est de montrer que les profils de charge pour la validation des modèles des SSE du bus n°2 peuvent être établis à partir de la simulation du fonctionnement de la poutre en mode dégradé, où les sources ACC2 et SCAP2 sont davantage sollicitées qu'en mode normal, suivant la gestion de l'énergie.

2.2.2.1 COMMANDE DE LA POUTRE EN MODE DEGRADE



En Figure IV-10 sont présentées la REM de la poutre en mode dégradé (sans les éléments de stockage du bus n°1) et sa Structure Maximale de Commande.

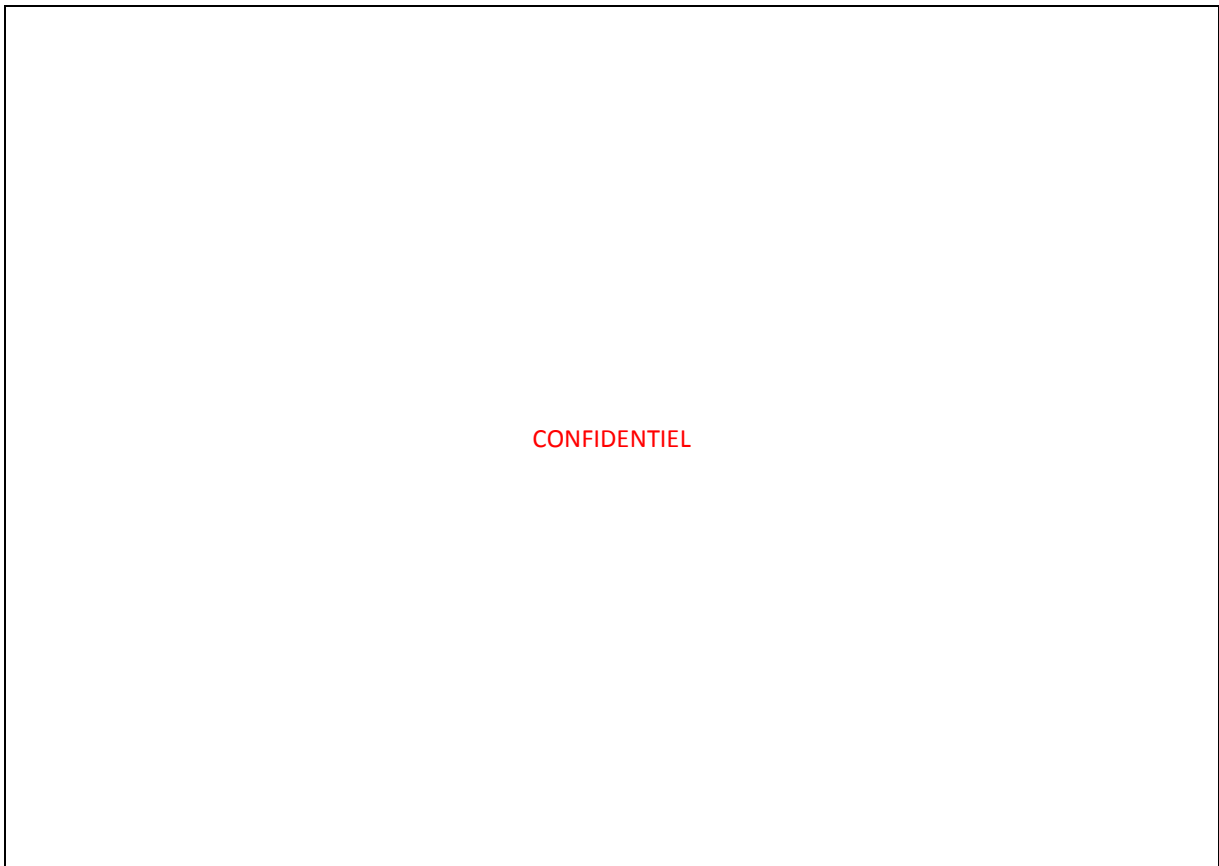


FIGURE IV-10 : REM DE LA POUTRE ET SA STRUCTURE MAXIMALE DE COMMANDE ASSOCIEE (EN MODE DEGRADE)

CONFIDENTIEL

En mode dégradé, les éléments de stockage ACC2 et SCAP2 sont davantage sollicités qu'en configuration normale. En effet, au début de mission, ils assurent seuls la fourniture de la puissance électrique à la poutre. Les profils de courant pour valider les modèles des sources du bus n°2 peuvent donc être établis à partir de la simulation du fonctionnement de la poutre en mode dégradé.

2.2.2.2 SIMULATION DE LA POUTRE EN MODE DEGRADE

Une simulation de la poutre électrique est effectuée en mode dégradé, sur une mission complète correspondant aux profils de charge définis dans le paragraphe IV.2.1. Les résultats présentés ci-après sont issus des travaux de Bienaimé [45]. L'allure des courants des éléments de stockage du bus n°2 est donnée en Figure IV-11. Les courants des sources ACC2 et SCAP2 ne sont pas régulés, contrairement à ceux des sources ACC1 et SCAP1. La convention utilisée est la suivante : le SSE se décharge quand le courant est négatif.

CONFIDENTIEL

FIGURE IV-11 : SIMULATION DE LA POUTRE ELECTRIQUE – ALLURE DES COURANTS DES SSE DU BUS N°2

On remarque que la sollicitation électrique des SSE est plus importante en début de mission, lorsqu'ils sont les seules sources disponibles. Cette constatation est confirmée par l'observation des états de charge des éléments de stockage du bus n°2 (Cf. Figure IV-12).

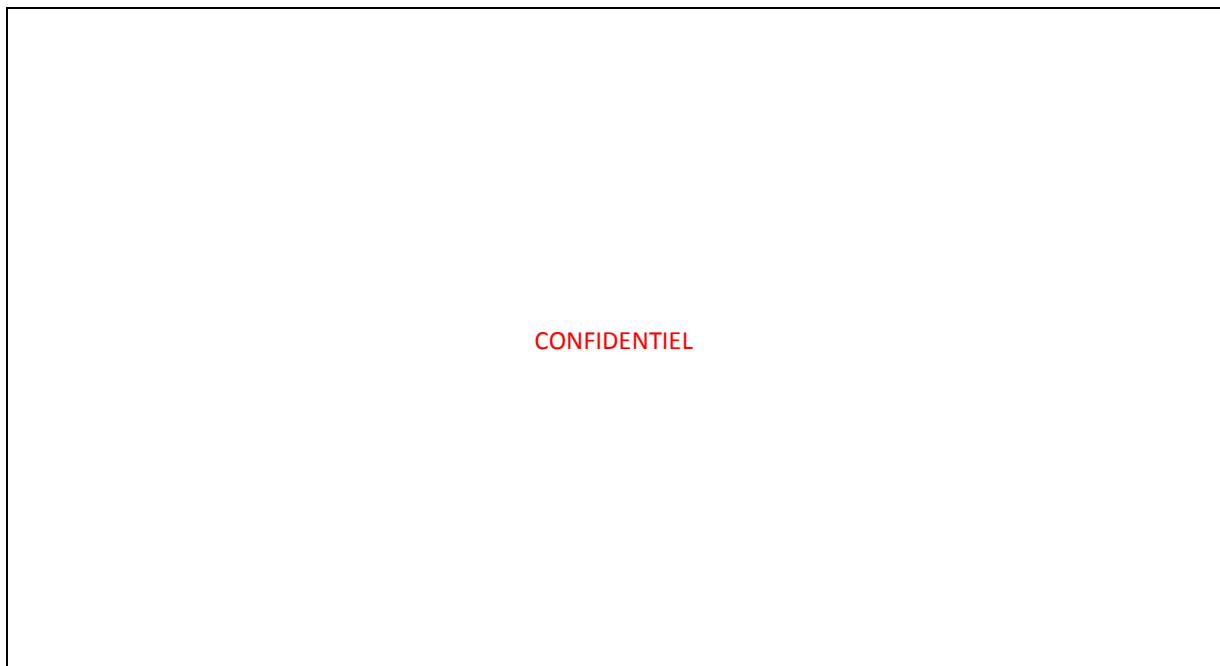
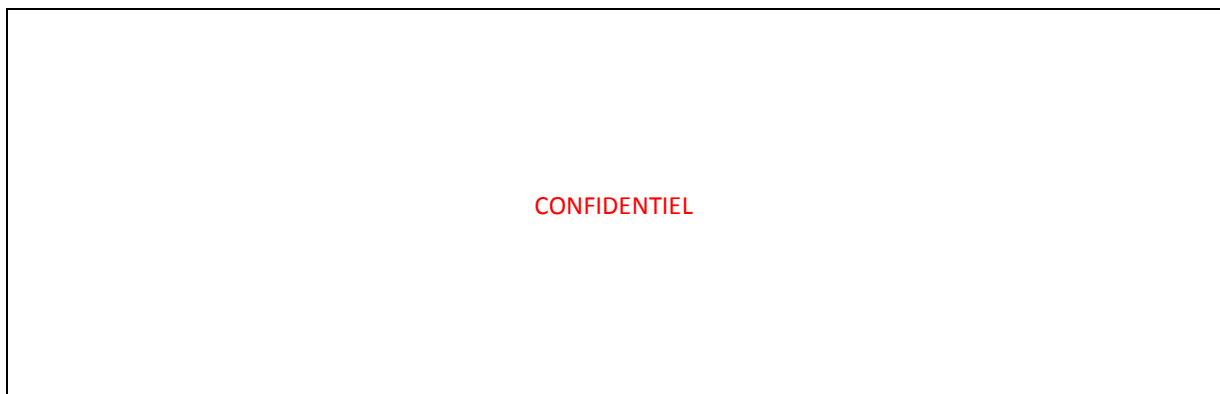


FIGURE IV-12 : SIMULATION DE LA POUTRE ELECTRIQUE – EVOLUTION DES ETATS DE CHARGE DES SSE DU BUS N°2



2.2.2.3 PROFIL DE COURANT POUR LA SOURCE SCAP2

Le profil de courant pour les supercondensateurs SCAP2 est obtenu en exploitant la simulation du fonctionnement de la poutre complète en mode dégradé, comme cela a été expliqué au paragraphe précédent. L'analyse de la consigne de courant demandée à la source SCAP2 (Cf. Figure IV-11) montre que sa puissance moyenne est nulle ; une régulation indirecte de la tension du bus n°2 maintient son état de charge autour de 100%. Le profil est donc essentiellement un profil en puissance et non en énergie. On retient donc les pics de courant les plus représentatifs pour élaborer le profil de validation à savoir ceux observés aux instants de démarrage des S/G. En Figure IV-13, le profil de courant adapté pour une cellule de 3000F est présenté.

Nota : les cellules d'accumulateur ACC2 n'ayant pas été caractérisées ni modélisées, aucun profil de courant n'est établi. Pour mémoire, ces accumulateurs sont de technologie Ni-Cd, sous le coup d'une interdiction, par directive européenne, de mise sur le marché à cause de la présence de cadmium en forte quantité.

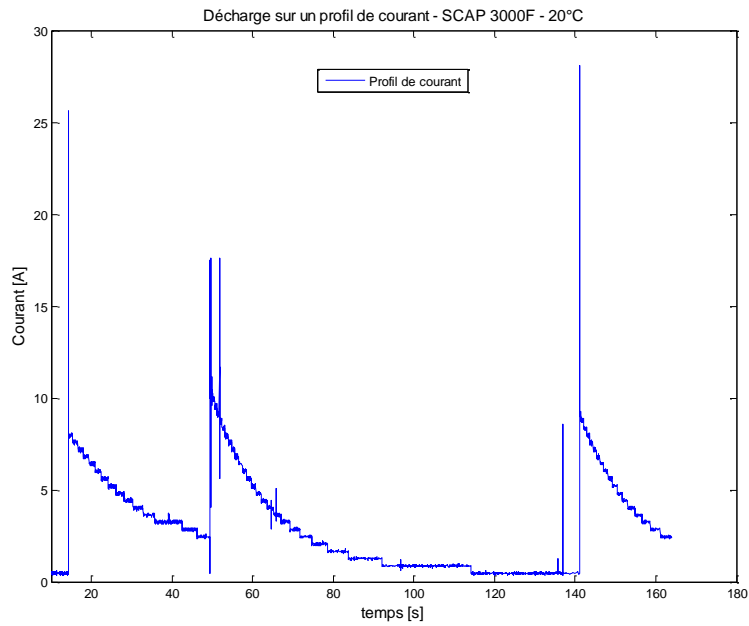


FIGURE IV-13 : PROFIL DE COURANT POUR VALIDATION DES MODELES DE SUPERCONDENSATEUR 3000F

Dans cette partie, les profils de courant pour la validation des modèles des SSE du bus n°2 ont été établis à partir de la simulation du fonctionnement de la poutre en mode dégradé, où les sources ACC2 et SCAP2 sont davantage sollicitées qu'en mode normal.

Pour conclure sur ce paragraphe consacré à l'établissement des profils de courant pour les éléments de stockage, un logigramme synthétisant la démarche est donné en Figure IV-14.

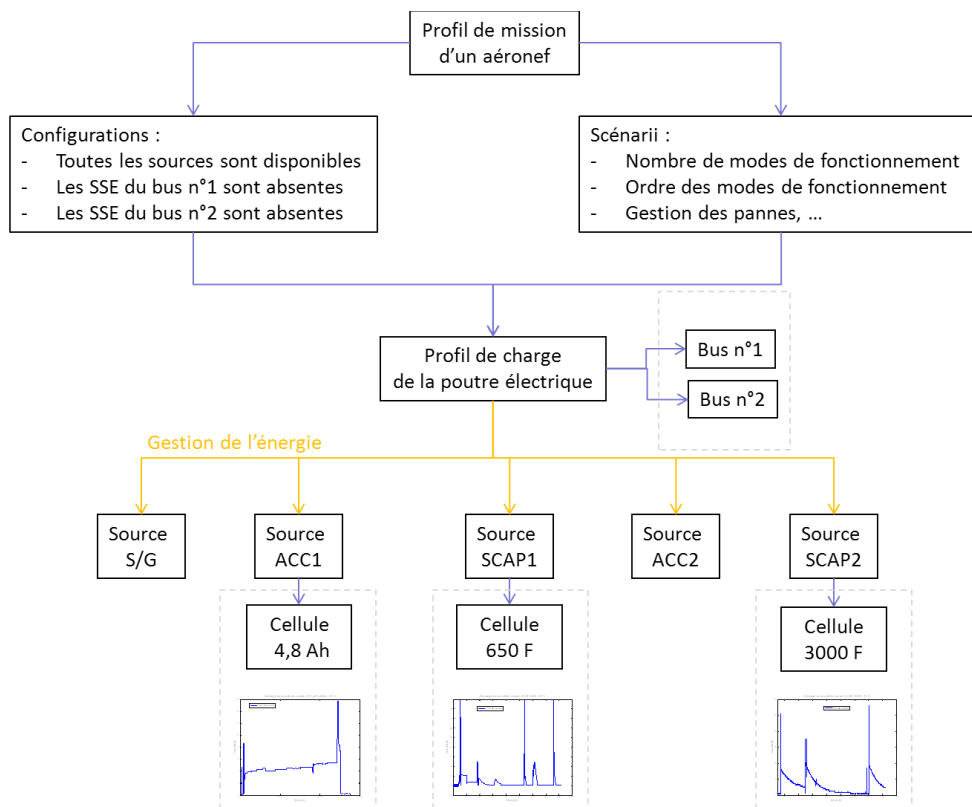


FIGURE IV-14 : LOGIGRAMME DE LA DEMARCHE POUR DEFINIR LES PROFILS DE COURANT A PARTIR D'UN PROFIL DE MISSION

3 VALIDATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR

3.1 PROCEDURE D'ESSAI POUR LA VALIDATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR

Les essais de validation des modèles d'accumulateur sont effectués par chronopotentiométrie, sur le banc d'essai décrit au paragraphe II.1.1. Lors de ces essais, le profil de courant donné en Figure IV-8 est appliqué à l'accumulateur et l'évolution de la tension à ses bornes en réponse à la sollicitation en courant est relevée. Ce profil correspond à un courant de décharge, l'accumulateur est donc préalablement chargé, conformément à la procédure de charge décrite dans le paragraphe II.2.1. Ces essais sont effectués à différentes températures : 0°C, 20°C et 40°C. Avant chaque essai, l'accumulateur est conditionné en chambre climatique à la température de l'essai pendant le temps nécessaire à son équilibre thermique.

Les essais sont effectués sur des cellules Li-ion polymère du constructeur Kokam et de capacité théorique 4,8Ah. Les essais de caractérisation ayant servi pour établir les modèles ont été réalisés sur les mêmes cellules.

3.2 RESULTATS D'ESSAIS ET EVALUATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR

Cette partie est consacrée à la présentation des résultats d'essais et à leur comparaison avec les résultats de simulation des modèles d'accumulateur. Pour rappel, les modèles retenus pour l'accumulateur Li-ion polymère sont : un modèle quasi-statique et un modèle dynamique. Le modèle quasi-statique (Cf. paragraphe II.3) est issu du modèle simple de Thévenin et est amélioré dans le sens où les non-linéarités sont prises en compte. Ce modèle fonctionnel est suffisant pour représenter le fonctionnement global d'un accumulateur. Le modèle dynamique (Cf. paragraphe III.4) traduit plus finement le comportement du composant en phases transitoires que le modèle quasi-statique. Ce modèle comportemental est nécessaire pour une étude fine du réseau (stabilité, compatibilité, ...).

Les résultats des essais à 40°C et des simulations des modèles à cette température sont présentés en Figure IV-15 et les écarts entre les modèles et la mesure sont donnés en Figure IV-16.

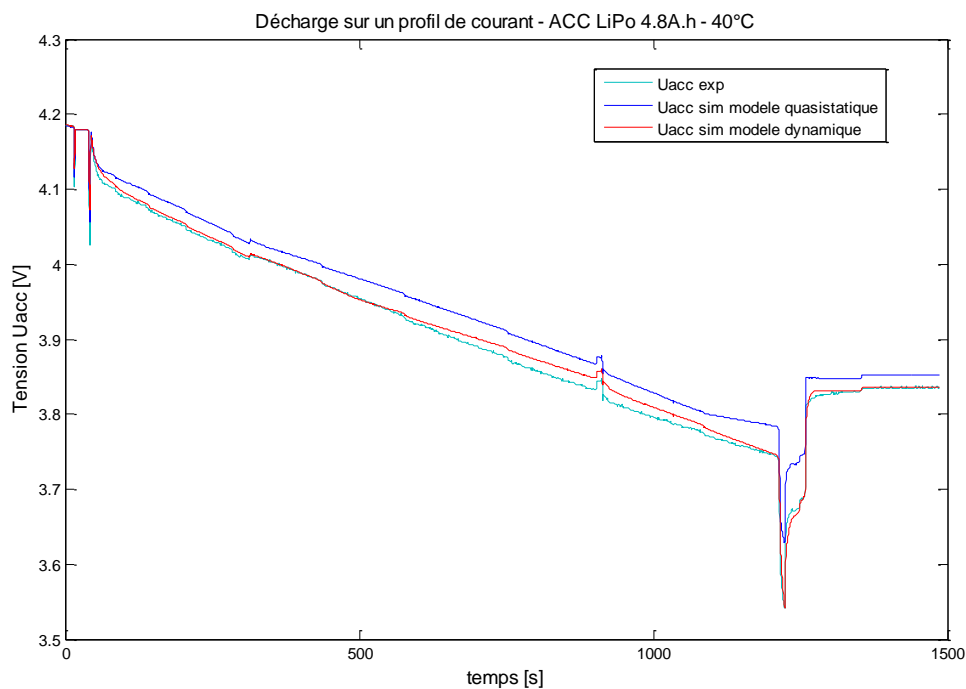


FIGURE IV-15 : VALIDATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR – PROFIL DE COURANT A 40°C – EVOLUTION DE LA TENSION

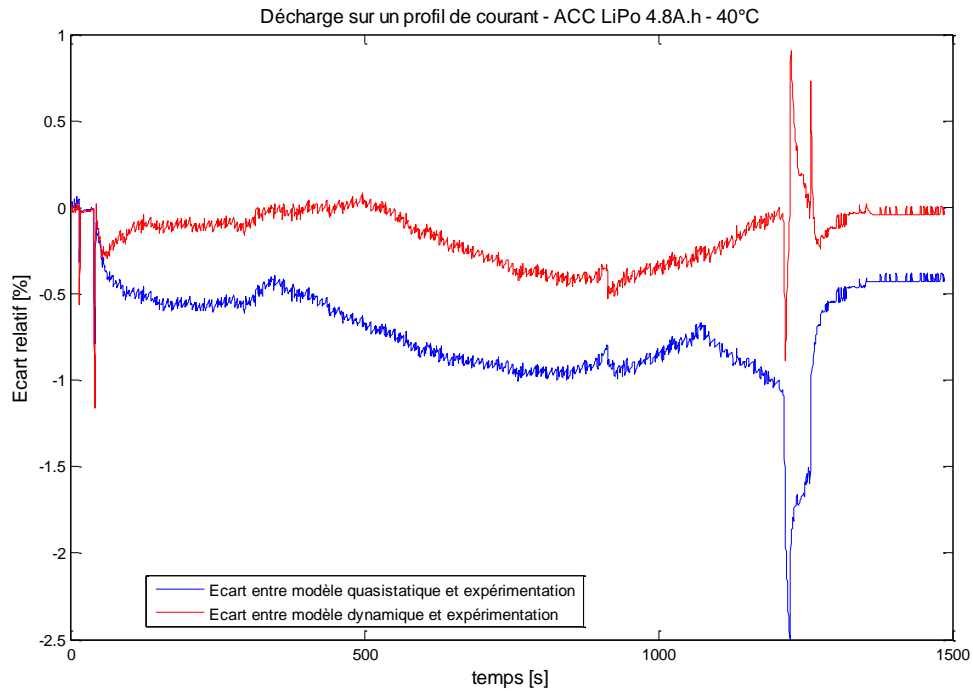


FIGURE IV-16 : VALIDATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR – PROFIL DE COURANT A 40°C – ECARTS AVEC LES MESURES

A 40°C, l'écart moyen entre le modèle quasi-statique et l'expérimentation est de -0,027V, soit moins de 1% et l'écart maximal, en valeur absolue, est de 0,089V, soit 2,5%. De même, on compare les résultats de simulation du modèle dynamique avec les relevés expérimentaux. L'écart moyen mesuré est de -0,006V, soit moins de 1% et l'écart maximal est de 0,047V en valeur absolue, soit 1,3%. Ces écarts sont relativement faibles, et sont légèrement inférieurs pour le modèle dynamique.

Les résultats des essais à 20°C et des simulations des modèles à cette température sont également présentés en Figure IV-17 et les écarts entre les modèles et la mesure sont donnés en Figure IV-18.

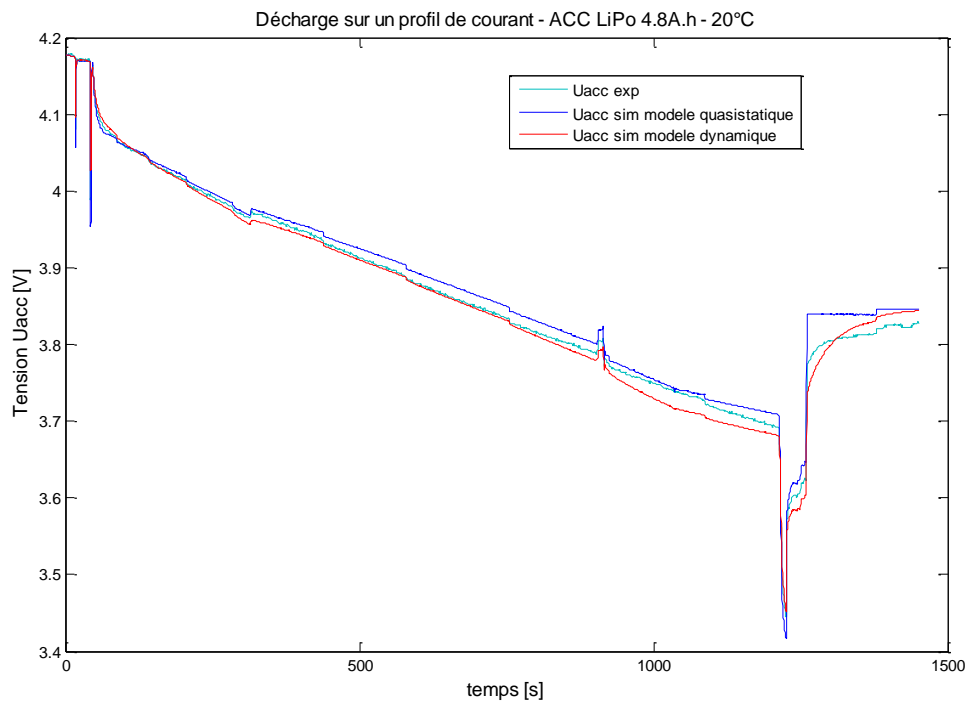


FIGURE IV-17 : VALIDATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR – PROFIL DE COURANT A 20°C – EVOLUTION DE LA TENSION

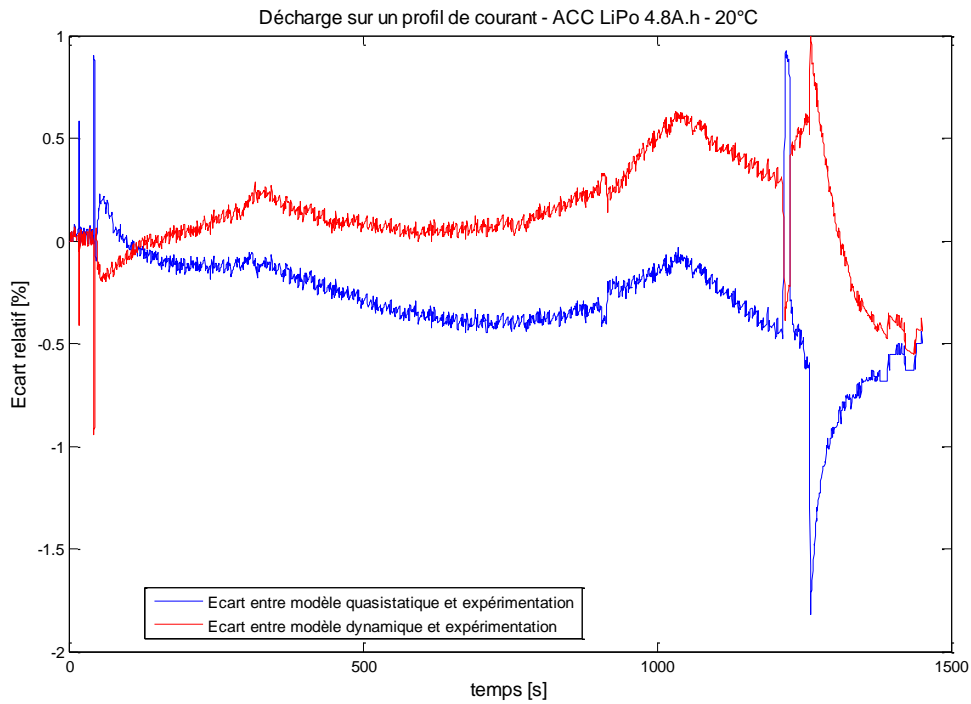


FIGURE IV-18 : VALIDATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR – PROFIL DE COURANT A 20°C – ECARTS AVEC LES MESURES

A 20°C, l'écart maximal entre le modèle quasi-statique et la mesure est de 1,8%. De même, on compare les résultats de simulation du modèle dynamique avec les relevés expérimentaux. L'écart maximal est de 1,0%. Ces écarts sont du même ordre de grandeur que ceux relevés à 40°C.

Enfin, les résultats des essais à 0°C et des simulations des modèles à cette température sont présentés en Figure IV-19 et les écarts entre les modèles et la mesure sont donnés en Figure IV-20.

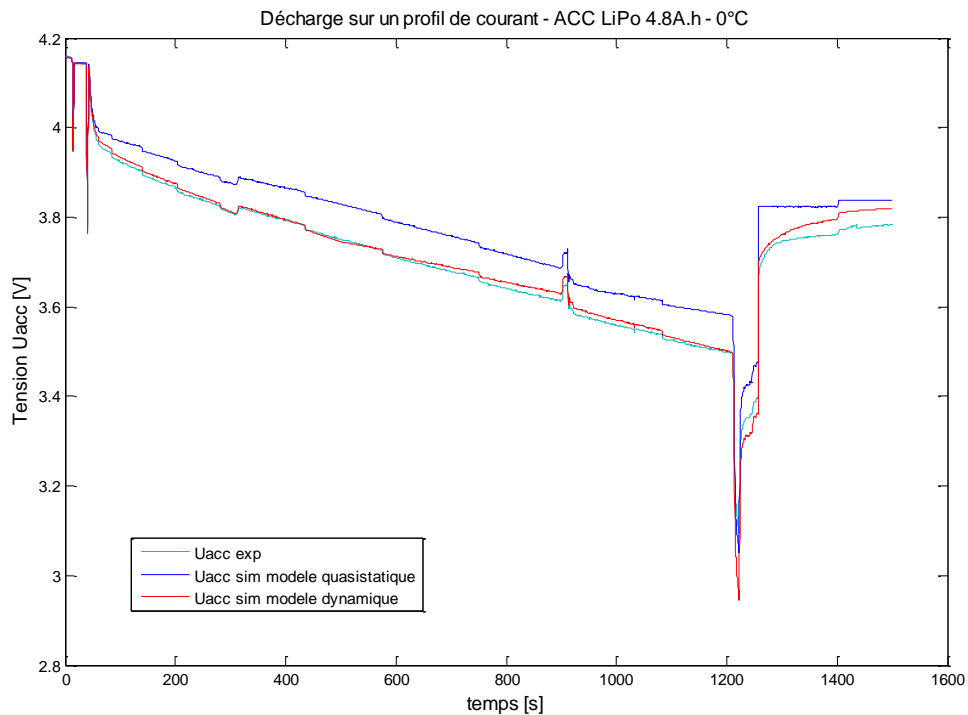


FIGURE IV-19 : VALIDATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR – PROFIL DE COURANT A 0°C – EVOLUTION DE LA TENSION

On note que, à 0°C, la tension aux bornes de la cellule d'accumulateur chute à environ 2,9V vers 1245s. En comparaison avec les résultats aux autres températures, la tension relevée au moment du pic de courant (à 1245s) est de 3,55V à 40°C et 3,4V à 20°C. Cela est cohérent avec les résultats des essais de caractérisation, où le comportement de l'accumulateur, fortement impédant à basse température, avait été observé.

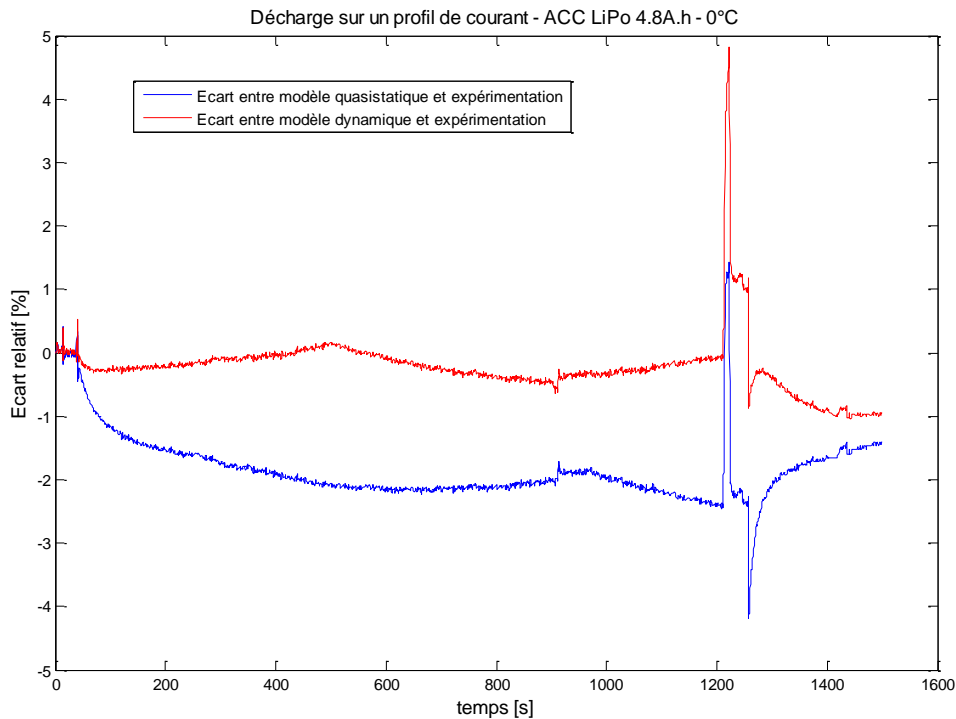


FIGURE IV-20 : VALIDATION DES MODELES D'ACCUMULATEUR – PROFIL DE COURANT A 0°C – ECARTS AVEC LES MESURES

A 0°C, l'écart maximal entre la mesure et le modèle quasi-statique est de 4,3%, ce qui est inférieur à l'écart maximal entre la mesure et le modèle dynamique, qui est de 4,9%. Néanmoins, l'écart moyen est un peu plus faible pour modèle dynamique.

Sur l'ensemble des résultats, les écarts sont faibles entre les résultats de simulation des modèles et les relevés expérimentaux. Les écarts les plus importants sont observés à basse température, mais cela reste acceptable. Ces écarts sont plus importants à basse température parce que l'impédance est plus élevée : la résistance du modèle quasi-statique est de l'ordre de 18mΩ à 40°C et de 70mΩ à 0°C pour un même état de charge. Une erreur de 5% sur la résistance à 40°C implique une variation de 0,9mΩ et la même erreur sur la résistance à 0°C implique une variation de 3,5mΩ. En réponse à une même sollicitation en courant, l'évolution de la tension est donc plus sensible à la résistance à basse température et une erreur de 5% sur la résistance n'a pas le même impact sur la tension à 40°C qu'à 0°C.

Par ailleurs, on relève une différence entre les deux modèles sur les phases transitoires. Le modèle dynamique est plus performant à ce niveau grâce à son impédance complexe représentant des phénomènes de constantes de temps diverses.

4 VALIDATION DES MODELES DE SUPERCONDENSATEUR

4.1 PROCEDURE D'ESSAI POUR LA VALIDATION DES MODELES DE SUPERCONDENSATEUR

Le banc d'essais tel que décrit dans le paragraphe II.1.1 est utilisé pour réaliser les essais de validation des modèles de supercondensateur. Le système d'acquisition a toutefois été modifié pour permettre des mesures à une période d'échantillonnage plus courte (5ms). Ces essais de validation sont effectués par chronopotentiométrie : l'évolution de la tension aux bornes des supercondensateurs 650F et 3000F est observée en réponse aux profils de courant respectivement donnés en Figure IV-9 et Figure IV-13. Les supercondensateurs sont chargés au préalable et conditionnés en chambre climatique à la température de l'essai pendant le temps nécessaire à leur stabilisation thermique. Les essais sont effectués à plusieurs températures, à savoir : -20°C, 0°C, 20°C, 40°C et 55°C. Les cellules de supercondensateurs testées sont de capacité 650F et 3000F, elles correspondent aux sources SCAP1 et SCAP2 de la poutre électrique. Les essais de caractérisation en vue de la modélisation ont été réalisés sur ces mêmes cellules.

4.2 RESULTATS D'ESSAIS ET EVALUATION DES MODELES DE SUPERCONDENSATEURS

Cette partie est dédiée à la présentation des résultats d'essais et à leur comparaison avec les résultats de simulation des modèles de supercondensateur. Dans un premier temps, les résultats relatifs aux cellules de 650F sont présentés. Concernant les cellules de 3000F, leurs résultats sont exposés dans un second temps. Pour mémoire, les modèles retenus pour les supercondensateurs sont : un modèle standard, un modèle à deux branches R-C et un modèle dynamique. Le modèle standard (Cf. paragraphe III.2) est un modèle simple composé d'une résistance en série avec un condensateur. Ce modèle fonctionnel est normalisé et est utilisé par les fabricants pour rédiger leurs spécifications techniques. Le modèle à deux branches R-C (Cf. paragraphe III.3) est un modèle fonctionnel qui intègre dans sa première branche la variation de la capacité en fonction de la tension à ses bornes. La deuxième branche représente des phénomènes lents de redistribution des charges après une charge ou une décharge. Le modèle dynamique (Cf. paragraphe III.4) est un modèle comportemental, composé d'une impédance complexe pour représenter au mieux le comportement du composant dans des phases transitoires. Comme pour les modèles d'accumulateur, le niveau de finesse des modèles est en lien avec l'utilisation qui en est faite : on utilisera les modèles fonctionnels pour des analyses énergétiques globales et les modèles comportementaux pour des analyses fines sur la qualité du réseau.

4.2.1 RESULTATS D'ESSAIS ET EVALUATION DES MODELES DE CELLULE 650F

Avant de présenter les résultats de simulation des modèles, les paramètres des trois modèles relatifs au supercondensateur B650F sont rappelés.

Le modèle standard est composé d'une résistance ESR [mΩ] qui varie avec la température suivant la relation IV-1 et d'une capacité C_{sc} , considérée comme constante quelle que soit la température et égale à 736F.

$$ESR = -6,2 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,33 \quad \text{IV-1}$$

Le modèle à deux branches R-C est composé d'une première branche dont la résistance R_i varie en fonction de la température selon la relation IV-2 et dont la capacité s'exprime en fonction de la tension selon la relation IV-3. Cette capacité ne varie pas en fonction de la température, les paramètres K et C_{i0} valent $90F \cdot V^{-1}$ et 570F.

$$R_i = -6,2 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,33 \quad \text{IV-2}$$

$$C_i = K \cdot V_{ci} + C_{i0} \quad \text{IV-3}$$

La deuxième branche est composée d'une résistance R_{rc} égale à 10Ω et d'une capacité C_{rc} égale à 10F.

Les paramètres essentiels du modèle dynamique sont la résistance R_{HF} , la résistance R_{BF} et la capacité C_{BF} . La résistance R_{HF} est considérée comme constante et égale à $0,40\text{m}\Omega$, quelles que soient la tension et la température. La résistance R_{BF} [$\text{m}\Omega$] n'évolue pas en fonction de la tension, mais évolue en fonction de la température suivant la relation IV-4. La capacité C_{BF} [F] évolue en fonction de la tension selon la relation IV-5.

$$R_{BF} = -6,2 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,034 \quad \text{IV-4}$$

$$C_{BF} = 74 \cdot V_{ci} + 550 \quad \text{IV-5}$$

Les résultats des essais à 20°C et des simulations des modèles à cette température sont présentés en Figure IV-21 et les écarts entre les modèles et la mesure sont donnés en Figure IV-22. L'évolution de la tension aux bornes du supercondensateur, issue de la simulation des modèles, est assez fidèle à celle relevée expérimentalement. On note un écart plus important pour le modèle standard à faible tension. En effet, ce modèle ne tient pas compte de l'évolution de la capacité en fonction de la tension. De fait, la capacité dans ce modèle est surévaluée à basse tension. Les modèles à deux branches R-C et dynamique prennent en considération l'influence de la tension sur la capacité. Il semble primordial d'intégrer cette propriété dans le modèle d'un supercondensateur et particulièrement dans celui de la source SCAP1. Effectivement, celle-ci est associée à un convertisseur et la tension à ses bornes est susceptible de varier et descendre assez bas. Comme expliqué en V.1.1.1, pour récupérer 75% de l'énergie stockée dans un supercondensateur, la tension à ses bornes doit chuter de moitié. Autrement dit, pour récupérer les trois-quarts de l'énergie stockée dans une cellule, il faut descendre à $1,35\text{V}$. A ce niveau de tension, l'influence de la tension sur la capacité est sensible.

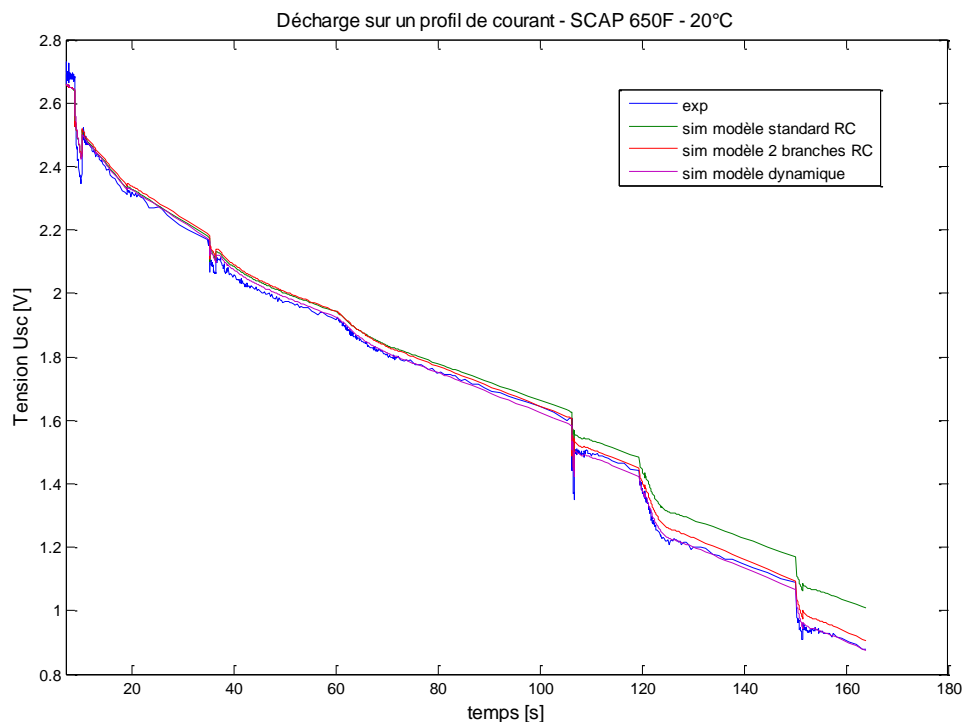


FIGURE IV-21 : VALIDATION DES MODELES DE CELLULE 650F – PROFIL DE COURANT A 20°C – EVOLUTION DE LA TENSION

Les écarts moyens entre les modèles et les mesures sont assez faibles et équivalents quels que soient les modèles. L'écart maximal est observé entre le modèle standard et la mesure, pour les raisons expliquées précédemment. Cet écart est de l'ordre de 15%, ce qui est significatif. La prise en compte de la variation de la capacité en fonction de la tension permet de limiter l'écart entre les modèles et les mesures à basse tension : pour le modèle à deux branches, l'écart maximal est autour de 5-7% et pour le modèle dynamique, l'écart est inférieur à 5%.

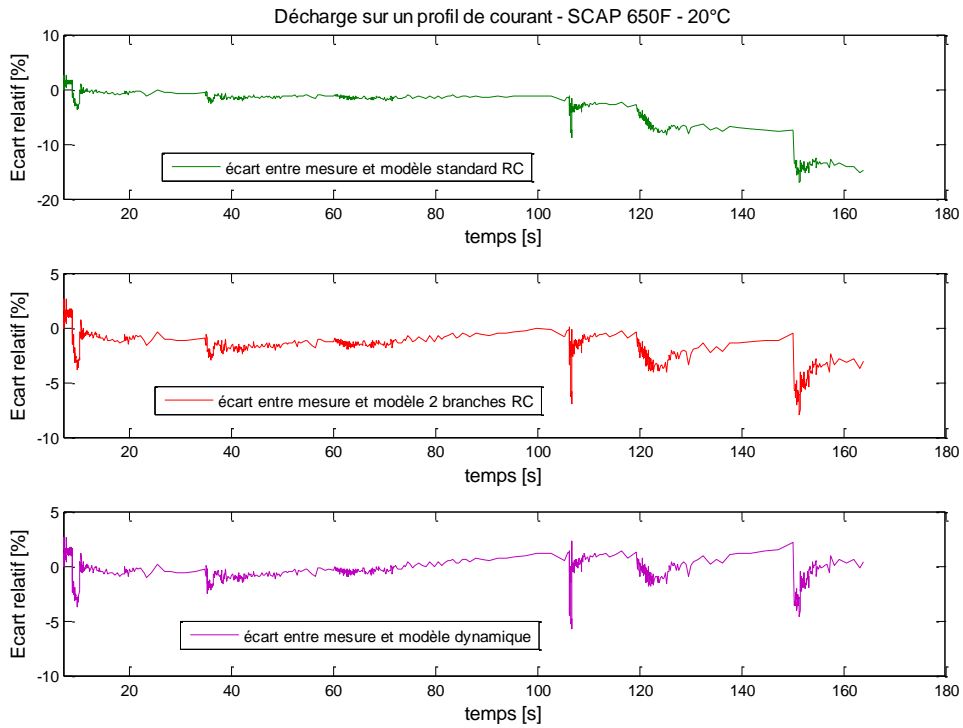


FIGURE IV-22 : VALIDATION DES MODELES DE CELLULE 650F – PROFIL DE COURANT A 20°C – ECARTS AVEC LES MESURES

Les résultats des essais à -20°C et des simulations des modèles (standard et dynamique) à cette température sont présentés en Figure IV-23 et les écarts entre les modèles et la mesure sont donnés en Figure IV-24.

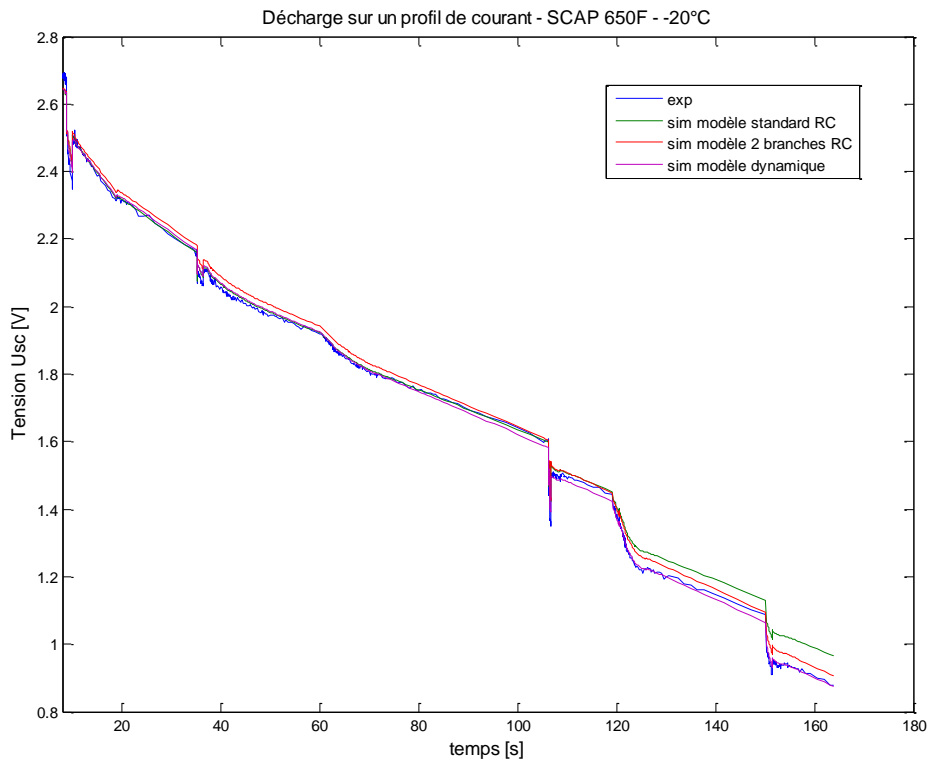


FIGURE IV-23 : VALIDATION DES MODELES DE CELLULE 650F – PROFIL DE COURANT A -20°C – EVOLUTION DE LA TENSION

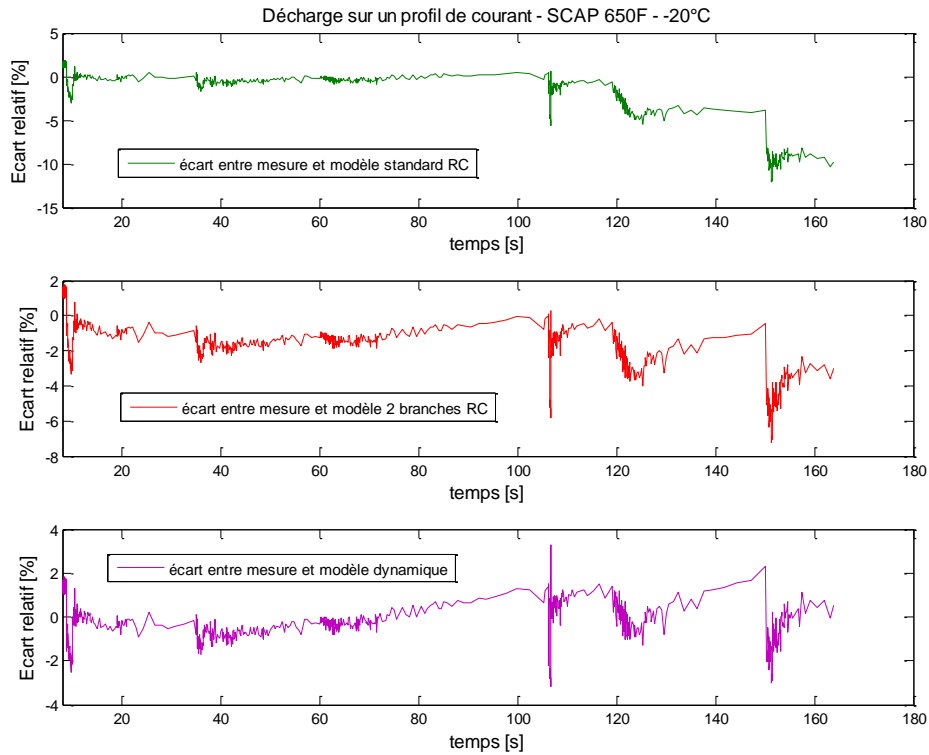


FIGURE IV-24 : VALIDATION DES MODELES DE CELLULE 650F – PROFIL DE COURANT A -20°C – ECARTS AVEC LES MESURES

Les écarts moyens entre les modèles et les mesures sont assez faibles. Comme pour les résultats à 20°C, le modèle standard présente un écart maximal avec la mesure plus grand (de l'ordre de 10%) que le modèle dynamique, spécifiquement à basse tension.

Les résultats des essais à 55°C et des simulations des modèles (standard et dynamique) à cette température sont présentés en Figure IV-25 et les écarts entre les modèles et la mesure sont donnés en Figure IV-26.

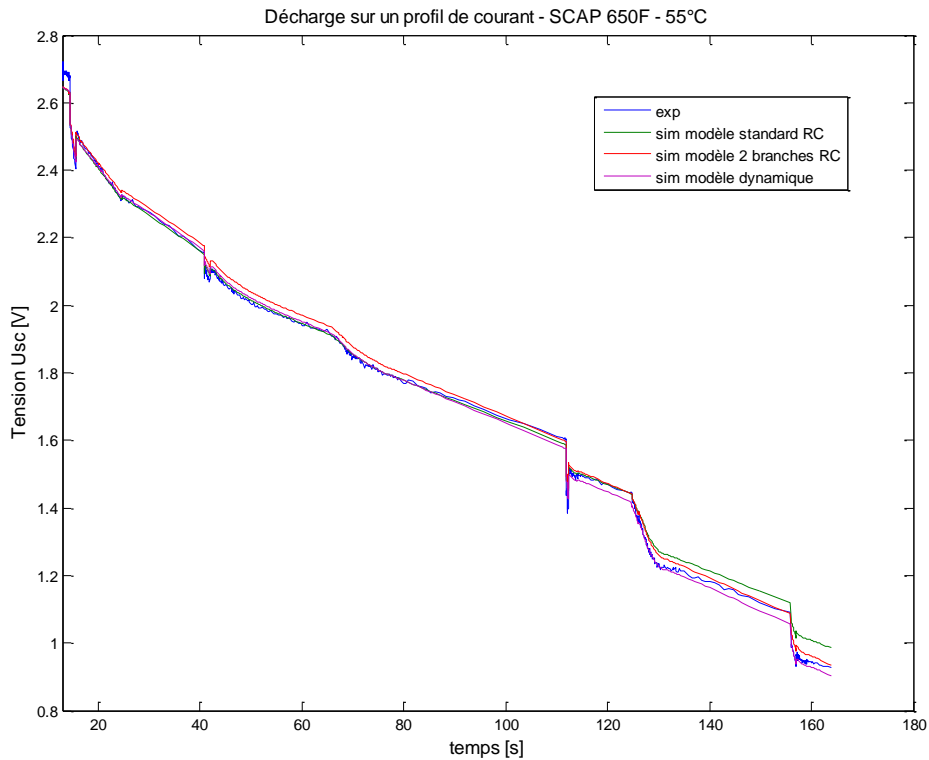


FIGURE IV-25 : VALIDATION DES MODELES DE CELLULE 650F – PROFIL DE COURANT A 55°C – EVOLUTION DE LA TENSION

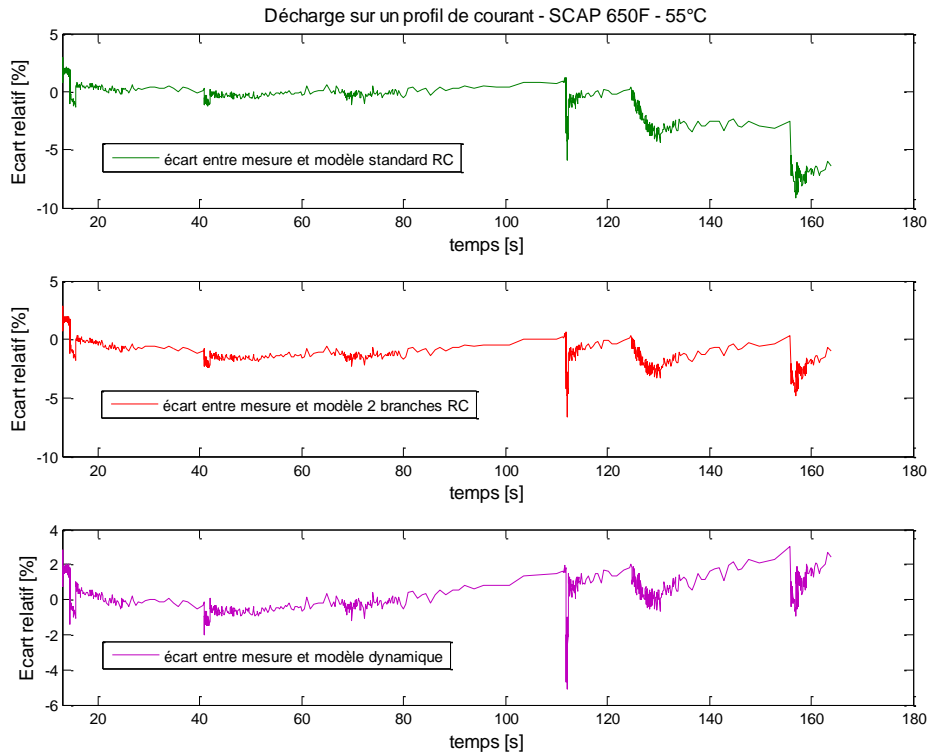


FIGURE IV-26 : VALIDATION DES MODELES DE CELLULE 650F – PROFIL DE COURANT A 55°C – ECARTS AVEC LES MESURES

On note que la tension du supercondensateur, mesurée à la fin de l’essai, est de 0,9V et ce quelle que soit la température et pour une même sollicitation en courant.

Les remarques faites pour les autres températures sont valables également à 55°C, et les écarts moyens et maxima entre les modèles et les mesures sont du même ordre de grandeur.

4.2.2 RESULTATS D’ESSAIS ET EVALUATION DES MODELES DE CELLULE 3000F

Avant de présenter les résultats de simulation des modèles, les paramètres des trois modèles relatifs au supercondensateur B3000F sont rappelés.

Le modèle standard est composé d’une résistance ESR [mΩ] qui varie avec la température suivant la relation IV-6 et d’une capacité C_{sc} , considérée comme constante quelle que soit la température et égale à 2934F.

$$ESR = -2,5 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,44 \quad \text{IV-6}$$

Le modèle à deux branches R-C est composé d’une première branche dont la résistance R_i [mΩ] varie en fonction de la température selon la relation IV-7 IV-2et dont la capacité C_i [F] s’exprime en fonction de la tension selon la relation IV-8.

$$R_i = -2,5 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,44 \quad \text{IV-7}$$

$$C_i = 500 \cdot V_{ci} + 2100 \quad \text{IV-8}$$

La deuxième branche est composée d’une résistance R_{rc} égale à 2Ω et d’une capacité C_{rc} égale à 100F.

Les paramètres essentiels du modèle dynamique sont : la résistance R_{HF} considérée comme constante et égale à 0,35mΩ, quelles que soient la tension et la température ; la résistance R_{BF} [mΩ] évoluant en fonction de la température suivant la relation IV-9 ; la capacité C_{BF} [F] évoluant en fonction de la tension selon la relation IV-10.

$$R_{BF} = -1,4 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,504 \quad \text{IV-9}$$

$$C_{BF} = 500 \cdot V_{ci} + 1700 \quad \text{IV-10}$$

Les résultats des essais sur les cellules 3000F à 20°C et des simulations des modèles (standard et dynamique) à cette température sont présentés en Figure IV-27 et les écarts entre les modèles et la mesure sont donnés en Figure IV-28.

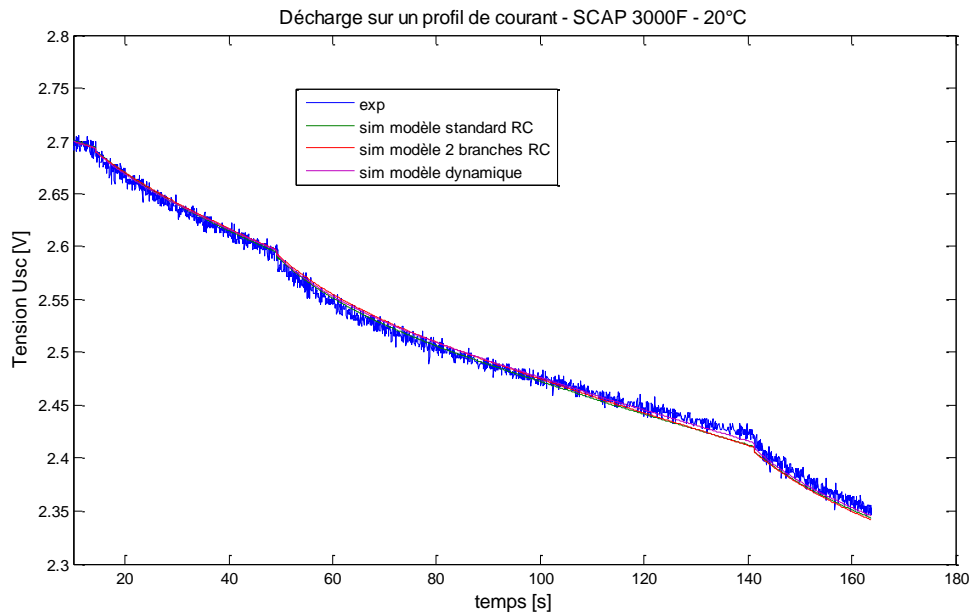


FIGURE IV-27 : VALIDATION DES MODELES DE CELLULE 3000F – PROFIL DE COURANT A 20°C – EVOLUTION DE LA TENSION

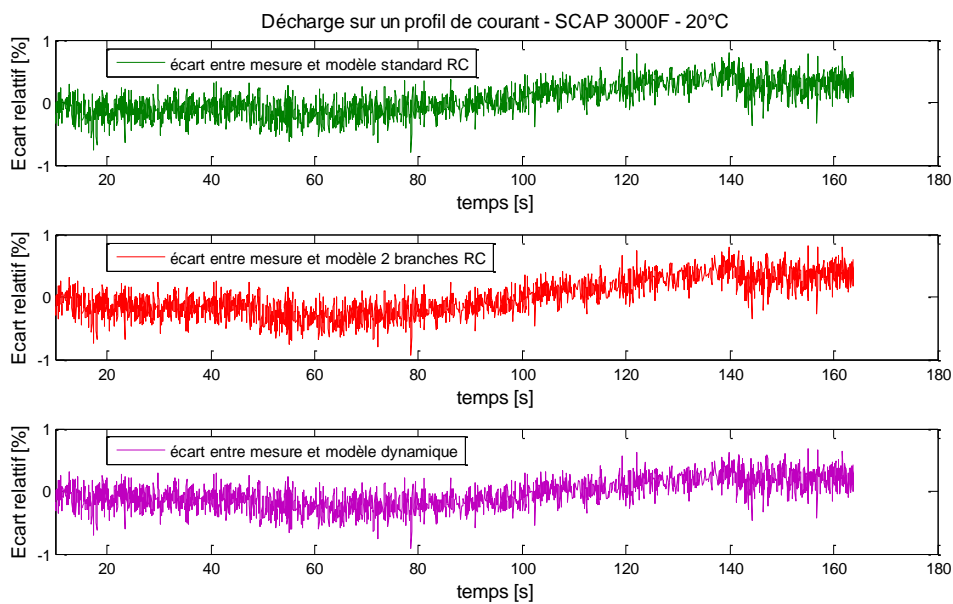


FIGURE IV-28 : VALIDATION DES MODELES DE CELLULE 3000F – PROFIL DE COURANT A 20°C – ECARTS AVEC LES MESURES

Les écarts entre modèles et mesures sont faibles (inférieurs à 1%), quels que soient les modèles.

Lors des essais de validation des modèles de supercondensateur 650F, les limites du modèle standard ont été mises en exergue, spécialement à basse tension où la capacité est surévaluée (la variation de la capacité en fonction de la tension n'est pas prise en compte). Contrairement à la source SCAP1 qui est associée à un convertisseur et pour laquelle la tension est susceptible d'évoluer du simple au double, la source SCAP2 est reliée directement au bus n°2, leurs tensions respectives sont donc identiques. Sur ce profil de courant, la

tension minimale mesurée aux bornes d'une cellule est de 2,35V, ce qui correspond à une profondeur de décharge de 25%. La connexion directe de la source SCAP2 avec le bus n°2 et la faible variation de la tension autorisée sur ce bus ont pour conséquence une utilisation limitée des supercondensateurs.

5 CONCLUSION SUR LA VALIDATION DE LA MODELISATION

Dans ce chapitre, les modèles établis dans les chapitres II et III ont été validés sur des profils de courant issus de l'Application. Dans un premier temps, l'élaboration des profils de courant a été présentée à partir des profils de mission type d'un aéronef, de l'architecture et de la stratégie de gestion de l'énergie (autrement dit la répartition des besoins énergétiques entre les sources en présence en fonction de critères spécifiques). Dans un second temps, les profils de courant tels que définis ont été appliqués aux composants lors d'essais en température et les résultats expérimentaux ont été comparés aux résultats de simulation des modèles développés précédemment.

La simulation des modèles de supercondensateur donne des résultats satisfaisants et variant peu suivant la température. En effet, le comportement d'un supercondensateur étant faiblement impacté par la température, les paramètres des modèles varient peu en fonction de la température (ils sont du même ordre de grandeur). Pour un accumulateur, son comportement est plus sensible à la température et les paramètres des modèles peuvent varier dans de grandes proportions (du simple au quadruple). Pour conclure sur l'impact de la température, la validité des modèles de supercondensateur reste la même quelle que soit la température ; en revanche, les modèles d'accumulateur nécessitent une précision importante sur la mesure de l'impédance car l'impédance, à basse température et faible état de charge, est élevée (de l'ordre de plusieurs dizaines de milli-Ohm).

En outre, on note un écart significatif entre le modèle quasi-statique et le modèle dynamique d'un accumulateur, particulièrement dans les phases transitoires. En effet, l'impédance du modèle quasi-statique est purement résistive et celle du modèle dynamique est complexe (composée d'une inductance en HF et d'une association série/parallèle de circuits R-C pour représenter les phénomènes MF et BF).

En ce qui concerne la modélisation des supercondensateurs, l'écart le plus notable est entre le modèle standard et les deux autres modèles. Cet écart est lié au fait que le modèle standard ne tient pas compte de la variation de la capacité en fonction de la tension. Cet inconvénient est plus dommageable pour le modèle de la source SCAP1 dont la tension aux bornes peut évoluer sur une large plage, que pour le modèle de la source SCAP2 pour laquelle l'évolution de la tension est davantage restreinte. En termes de réponse dynamique, on constate que le modèle standard ou le modèle à deux branches R-C donnent des résultats assez proches de ceux du modèle dynamique. Cela s'explique par le fait que les deux modèles fonctionnels intègrent l'information relative à une certaine constante de temps par l'intermédiaire du simple circuit R-C pour le modèle standard et de la première branche R-C du modèle à deux branches.

Enfin, compte-tenu des écarts observés entre les différents modèles et les relevés expérimentaux, on estime que les modèles, tels que développés, sont valides par rapport à l'application attendue, sur l'intervalle de tension (ou d'état de charge) et sur la plage de température propres à chaque composant.

V. CHAPITRE 5 : DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE

Ce dernier chapitre est dédié au dimensionnement des éléments de stockage. Tout d'abord, une introduction au dimensionnement des accumulateurs électrochimiques et des supercondensateurs est effectuée, avec un rappel sur les caractéristiques des SSE et les propriétés de leurs associations. Dans un aéronef conventionnel, les batteries d'accumulateurs sont connectées directement sur le bus n°2 et ont pour rôle, entre autres, d'assurer le démarrage de l'aéronef. Les batteries sont alors dimensionnées pour cette fonction. Dans un aéronef plus électrique, comme celui étudié dans le Projet, les éléments de stockage sont multiples et sont connectés (directement ou via un convertisseur) aux bus. Leur fonction est d'assurer le démarrage de l'aéronef, mais également de fournir une puissance à dynamique élevée, en complément de la génération électrique par les S/G, tout au long de la mission. Leur définition doit donc tenir compte de ce changement de périmètre fonctionnel. Le dimensionnement des éléments de stockage s'effectue donc en deux étapes, une première consistant à dimensionner les SSE par rapport à l'aspect le plus dimensionnant, en l'occurrence le début de mission où les éléments de stockage sont les seules sources disponibles ; la deuxième consiste à vérifier que ce dimensionnement est valable sur la suite de la mission. L'influence de certains paramètres de réglage sur le dimensionnement est étudiée, spécifiquement dans le but de réduire la masse du système de stockage. En fin de chapitre, une validation du dimensionnement est réalisée, par simulation du comportement des éléments de stockage dans le domaine temporel, en réponse à un profil de charge type.

1 INTRODUCTION AU DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE

Dans cette première partie, quelques généralités sur les caractéristiques énergétiques des éléments de stockage sont rappelées, en complément du chapitre I. Ensuite, une méthode de dimensionnement est proposée pour chacun des éléments de stockage : le premier paragraphe est consacré aux supercondensateurs et le deuxième est dédié aux accumulateurs. Enfin, plusieurs manières d'associer des SSE sont passées en revue dans le troisième paragraphe, avant de préciser les associations relatives à cette application et les conséquences que cela implique sur le dimensionnement du système de stockage complet.

1.1 DIMENSIONNEMENT D'UN PACK DE SUPERCONDENSATEURS

Avant d'étudier leur dimensionnement, quelques généralités sur les caractéristiques énergétiques et électriques des supercondensateurs et des associations de supercondensateurs sont rappelées. Ensuite, une méthode de dimensionnement est présentée. Dans la littérature, plusieurs procédés ont été définis. La démarche la plus courante (utilisée dans [15] et [79]) est un dimensionnement à partir de la puissance car les supercondensateurs sont utilisés comme une source de puissance. Dans notre cas, le dimensionnement proposé est d'abord en énergie (comme suggéré dans [80]) et la puissance est prise en compte dans un second temps. En effet, le dimensionnement d'un composant est lié à son mode d'utilisation. Pour cette application, on a vu au paragraphe IV.2.1 que les éléments de stockage sont les seules sources en présence pendant les vingt premières minutes d'une mission et que ceci est particulièrement dimensionnant pour les SSE, y compris pour les supercondensateurs qui ne sont pas rechargés pendant cette période. En outre, la plupart des méthodes de dimensionnement exposées dans la littérature [42], [79], [80] considère une cellule ou un module de base pré-choisi. Dans notre étude, le dimensionnement proposé permet de déterminer la cellule ou le module unitaire adéquat parmi une base de données, la solution optimale étant déterminée à partir d'un critère autre que les performances énergétiques.

1.1.1 GENERALITES SUR LES CARACTERISTIQUES ENERGETIQUES D'UN SUPERCONDENSATEUR

En complément des grandeurs caractéristiques données en 1.2.2.4, les caractéristiques énergétiques d'un supercondensateur sont détaillées dans ce paragraphe. Pour faciliter la compréhension, les grandeurs présentées ci-après sont rapportées au modèle standard R-C du supercondensateur (Cf. Figure V-1).

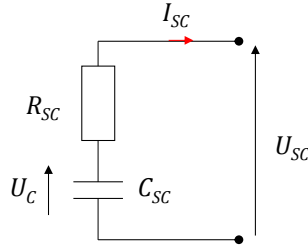


FIGURE V-1 : MODELE D'UN SUPERCONDENSATEUR (MODELE STANDARD R-C)

La convention utilisée est la suivante : lorsque la puissance est positive, le supercondensateur se décharge et restitue de l'énergie ; lorsque la puissance est négative, il se charge et emmagasine de l'énergie.

Ratio de tension / Profondeur de décharge d'un supercondensateur

On définit généralement une tension minimale U_{sc_min} , en dessous de laquelle il n'est pas conseillé de descendre lors de la décharge d'un supercondensateur, et le ratio de tension d tel que :

$$d = \frac{U_{c_min}}{U_{c_max}} \quad \text{v-1}$$

Avec : U_{c_min} : tension minimale aux bornes de la capacité du supercondensateur [V]

U_{c_max} : tension maximale aux bornes de la capacité du supercondensateur [V]

Pour une tension maximale U_{sc_max} , l'énergie maximum W_{sc_max} [J] stockée dans le supercondensateur est :

$$W_{sc_max} = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U_{c_max}^2 \quad \text{v-2}$$

L'énergie maximale stockée dans un supercondensateur ne pouvant être entièrement restituée, on définit alors l'énergie utile W_{sc_utile} [J] en tenant compte du ratio de tension :

$$W_{sc_utile} = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U_{c_max}^2 - \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U_{c_min}^2 = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U_{c_max}^2 (1 - d^2) = W_{sc_max} (1 - d^2) \quad \text{v-3}$$

Pour un ratio de 0,5 correspondant à une tension minimale égale à la moitié de la tension maximale, l'énergie utile restituée par le supercondensateur est égale aux trois-quarts de l'énergie maximale stockée. Autrement dit, sa profondeur de décharge est de 75% lorsque la variation de tension à ses bornes est de 50%.

Puissance maximale dans un supercondensateur

La puissance dans un supercondensateur P_{sc} [W] peut être exprimée par le produit entre la tension à ses bornes U_{sc} [V] et le courant le traversant I_{sc} [A], comme suit :

$$P_{sc} = U_{sc} \cdot I_{sc} \quad \text{v-4}$$

L'application de la loi de Kirchhoff à la Figure V-1 donne la relation suivante :

$$U_{sc} = U_c - R_{sc} \cdot I_{sc} \quad \text{v-5}$$

Exprimée en puissance et en intégrant l'équation v-4, cette relation peut s'écrire également :

$$R_{sc} \cdot I_{sc}^2 - U_c \cdot I_{sc} + P_{sc} = 0 \quad \text{v-6}$$

Cette équation du second ordre admet deux solutions si son déterminant est positif, c'est-à-dire si :

$$\Delta = U_c^2 - 4R_{sc} \cdot P_{sc} > 0 \quad \text{V-7}$$

Cette condition donne lieu à deux limites, une en tension U_{c_min} et une en puissance P_{sc_max} . La condition limite en tension est :

$$U_{c_min} = 2\sqrt{R_{sc} \cdot P_{sc}} \quad \text{V-8}$$

On a alors un ratio minimal en tension donné par :

$$d_{min} = \frac{2\sqrt{R_{sc} \cdot P_{sc}}}{U_{c_max}} \quad \text{V-9}$$

L'intégration du ratio minimal dans l'expression de l'énergie utile v-3 donne la relation suivante :

$$W_{sc_utile} = W_{sc_max} \cdot (1 - d^2) = W_{sc_max} \cdot \left(1 - \frac{4R_{sc} \cdot P_{sc}}{U_{c_max}^2}\right) \quad \text{V-10}$$

D'où la limite en puissance :

$$P_{sc_max} = \frac{U_{c_max}^2}{4 \cdot R_{sc}} \quad \text{V-11}$$

Enfin, la solution en courant à l'équation du second ordre v-6 est la suivante :

$$I_{sc} = \frac{U_c}{2R_{sc}} - \frac{1}{2R_{sc}} \sqrt{U_c^2 - 4R_{sc} \cdot P_{sc}} \quad \text{V-12}$$

Notion de rendement énergétique

Si on considère un supercondensateur à l'état initial chargé (sous tension maximale U_{sc_max}), l'évolution de la tension à ses bornes pendant la décharge est :

$$U_{sc} = U_c - R_{sc} \cdot I_{sc} = U_{c_max} - \Delta U_c - R_{sc} \cdot I_{sc} = U_{c_max} - \frac{1}{C_{sc}} \cdot I_{sc} \cdot \Delta t - R_{sc} \cdot I_{sc} \quad \text{V-13}$$

Le temps de décharge T_d [s] correspondant à une décharge à courant constant, pendant laquelle la tension évolue de U_{c_max} à U_{c_min} , est donné par la relation suivante :

$$T_d = C_{sc} \cdot \frac{U_{c_max} - U_{c_min}}{I_{sc}} = C_{sc} \cdot \frac{U_{c_max}(1 - d)}{I_{sc}} \quad \text{V-14}$$

Pendant la période de décharge à courant I_{sc} constant, l'énergie W_{Rsc} [J] dissipée par effet Joule dans la résistance interne du supercondensateur est :

$$W_{Rsc} = \int_0^{T_d} R_{sc} \cdot I_{sc}^2 \cdot dt = R_{sc} \cdot I_{sc}^2 \cdot T_d \quad \text{V-15}$$

En intégrant l'équation v-14, l'expression de l'énergie dissipée dans la résistance interne devient :

$$W_{Rsc} = R_{sc} \cdot C_{sc} \cdot I_{sc} \cdot U_{c_max} \cdot (1 - d) \quad \text{V-16}$$

Le rendement énergétique η_{sc} [%] est défini ci-dessous, en fonction de l'énergie utile au sens où elle est donnée dans l'équation v-3 et à courant de décharge constant :

$$\eta_{sc} = \frac{W_{sc_utile} - W_{Rsc}}{W_{sc_utile}} = 1 - 2R_{sc} \cdot \frac{I_{sc}}{U_{c_max}} \cdot \frac{1}{(1 + d)} \quad \text{V-17}$$

Le rendement énergétique peut également s'exprimer en fonction du temps de décharge, en intégrant v-14 :

$$\eta_{sc} = 1 - 2R_{sc} \cdot C_{sc} \cdot \frac{1}{T_d} \cdot \frac{(1 - d)}{(1 + d)} \quad \text{V-18}$$

1.1.2 CARACTERISTIQUES D'UN PACK DE SUPERCONDENSATEURS

En Figure V-2 est présenté le modèle d'un pack de supercondensateurs établi à partir du modèle standard d'un élément de supercondensateur. Les équations V-19, V-20, V-21 et V-22 établissent les relations entre les grandeurs d'une cellule et celles du pack résultant de l'association de N_{sc} cellules en série et Np_{sc} cellules en parallèle. Le nombre de cellules total N_{sc} est égal au produit de N_{sc} par Np_{sc} .

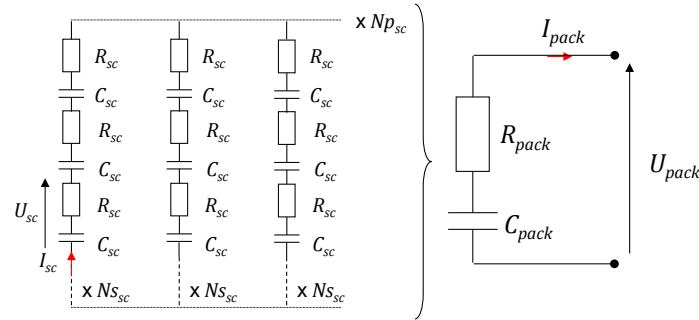


FIGURE V-2 : MODELE D'UN PACK DE SUPERCONDENSATEURS

$$C_{pack} = \frac{Np_{sc}}{Ns_{sc}} \cdot C_{sc} \quad \text{V-19}$$

$$R_{pack} = \frac{Ns_{sc}}{Np_{sc}} \cdot R_{sc} \quad \text{V-20}$$

$$I_{pack} = Np_{sc} \cdot I_{sc} \quad \text{V-21}$$

$$U_{pack} = Ns_{sc} \cdot U_{sc} \quad \text{V-22}$$

$$N_{sc} = Ns_{sc} \cdot Np_{sc} \quad \text{V-23}$$

L'énergie et la puissance d'un pack de supercondensateurs sont obtenues respectivement par la somme de l'énergie et de la puissance des N_{sc} cellules composant le pack.

$$W_{pack} = N_{sc} \cdot W_{sc} \quad \text{V-24}$$

$$P_{pack} = N_{sc} \cdot P_{sc} \quad \text{V-25}$$

1.1.3 METHODE POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UN PACK DE SUPERCONDENSATEURS

Le dimensionnement d'un pack de supercondensateurs consiste à déterminer la cellule de supercondensateur *ad hoc* et le nombre de cellules nécessaire pour satisfaire les besoins énergétiques demandés à cette source, tout en respectant les contraintes imposées par son environnement et liées à ses propres limites technologiques.

Les données d'entrée pour dimensionner un pack de supercondensateurs sont d'une part les performances énergétiques attendues et d'autre part les contraintes s'exerçant sur cette source. Tout d'abord, les performances énergétiques s'expriment au travers de l'énergie que doit fournir le dispositif de stockage. On parle ici de l'énergie utile, au sens de l'énergie susceptible d'être restituée par le SSE. Ainsi, une attention particulière doit être portée sur la notion de profondeur de décharge autorisée ou souhaitée. Ensuite, les contraintes limitant le champ des possibles sont à considérer, elles sont diverses. Le premier type de contrainte

est d'ordre technologique. Il s'agit de s'assurer que le courant maximal demandé au pack de supercondensateurs, image de la puissance maximale demandée, est inférieur au courant admissible par les cellules. Le deuxième type de contrainte est systémique dans le sens où le pack de supercondensateurs s'inscrit dans un système et que l'impact de ce dernier sur le SSE est à prendre en compte. Le mode de connexion au bus (connexion directe ou via un convertisseur), entre autres, influence le niveau de tension aux bornes du pack.

Les résultats du dimensionnement sont : le nombre de cellules constituant le pack (leur association en série et en parallèle), les performances du pack tel que dimensionné (énergie et puissance maximale) et les caractéristiques électriques ou autres (capacité totale, résistance interne, masse, volume, ...).

L'objectif du dimensionnement est de déterminer le nombre de cellules en série et en parallèle, certes, mais il doit permettre également de déterminer la cellule unitaire la plus appropriée en fonction d'un critère à définir. L'algorithme est donc réalisé de manière à déterminer la solution optimale correspondant à la minimisation du critère choisi. Dans notre cas, le critère retenu est la masse car la densité d'énergie est primordiale pour une application embarquée. Il pourrait s'agir de critères d'encombrement (volume), électriques ou thermiques (résistance interne et pertes Joule), économiques (coût), entre autres.

L'algorithme en Figure V-3 est proposé pour décrire séquentiellement le dimensionnement du pack de supercondensateur. Les étapes du dimensionnement sont détaillées ci-après.

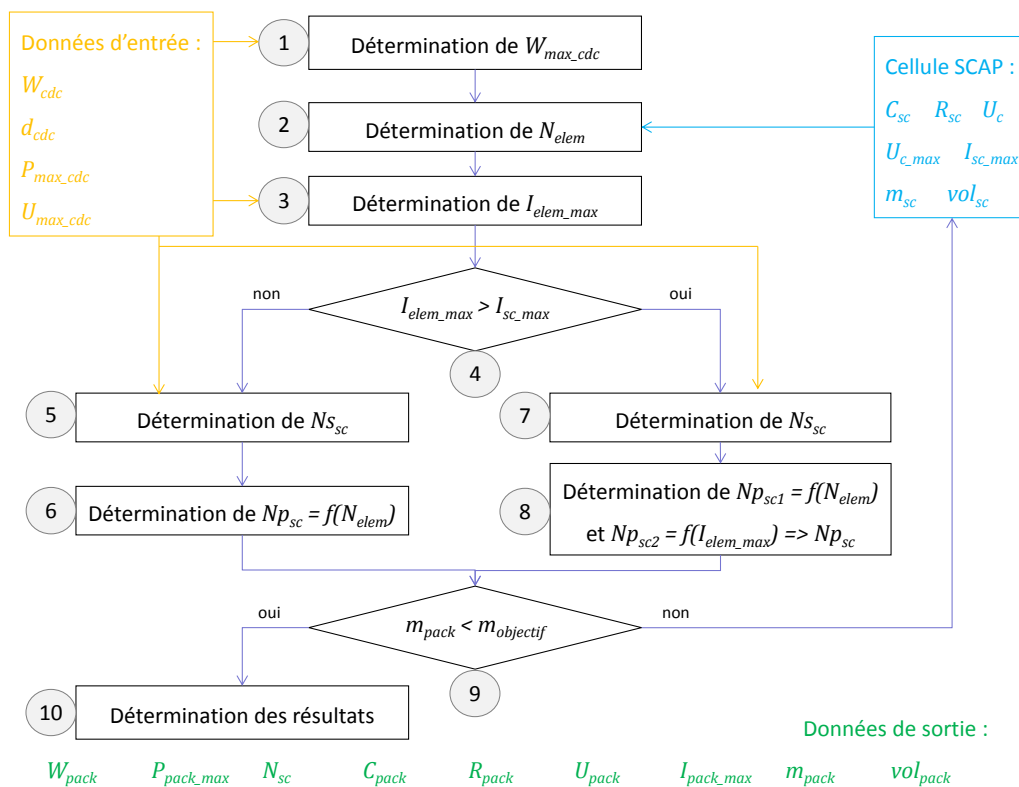


FIGURE V-3 : ALGORIGRAMME DE DIMENSIONNEMENT D'UN PACK DE SUPERCONDENSATEURS

Etape 1 : Détermination de l'énergie maximale W_{max_cdc} à partir de l'énergie demandée

L'énergie demandée W_{cdc} est l'énergie utile. Le dimensionnement s'effectue à partir de l'énergie maximale stockée. En appliquant la relation entre l'énergie utile et l'énergie maximale stockée donnée en v-3, on a :

$$W_{max_cdc} = \frac{W_{cdc}}{(1 - d_{cdc}^2)}$$

V-26

Etape 2 : Détermination du nombre d'éléments nécessaire pour fournir l'énergie W_{cdc}

Le nombre d'éléments N_{elem} est le rapport entre l'énergie maximale demandée W_{max_cdc} et l'énergie maximale W_{sc_max} (Cf. relation v-2) que peut fournir une cellule.

$$N_{elem} = \frac{W_{max_cdc}}{W_{sc_max}} = \frac{W_{max_cdc}}{\frac{1}{2} C_{sc} \cdot U_{c_max}^2} \quad \text{V-27}$$

Etape 3 : Détermination du courant maximum dans un élément I_{elem_max}

Le courant maximum dans un élément dépend du nombre d'éléments déterminé précédemment et de la puissance maximale demandée au pack P_{max_cdc} . L'expression du courant ci-dessous est issue de la relation v-12 :

$$I_{elem_max} = \frac{U_c}{2R_{sc}} - \frac{1}{2N_{elem} \cdot R_{sc}} \sqrt{(N_{elem} \cdot U_c)^2 - 4N_{elem} \cdot R_{sc} \cdot P_{max_cdc}} \quad \text{V-28}$$

Etape 4 : Vérification par rapport au courant maximal admissible dans une cellule

Le courant I_{elem_max} correspond au courant maximal à fournir pour respecter le cahier des charges. Il est nécessaire de vérifier si ce courant est compatible avec les limites de la cellule unitaire, à savoir I_{sc_max} .

Etapes 5 et 6 : Dans le cas où le courant maximal demandé I_{elem_max} est inférieur au courant maximal dans une cellule I_{sc_max} , on détermine les nombres de cellules en parallèle Np_{sc} et en série Ns_{sc} de la manière suivante : tout d'abord, le nombre de cellules en série est déterminé en tenant compte de la contrainte sur la tension du pack exprimée en v-29. Puis le nombre de cellules en parallèle est obtenu à partir de N_{elem} et de Ns_{sc} .

$$U_{pack} = Ns_{sc} \cdot (U_c - R_{sc} \cdot I_{elem}) \leq U_{max_cdc} \quad \forall I_{elem} \quad \text{V-29}$$

$$Ns_{sc} \leq \frac{U_{max_cdc}}{U_{c_max}} \quad \text{V-30}$$

$$Np_{sc} \geq \frac{N_{elem}}{Ns_{sc}} \quad \text{V-31}$$

Etapes 7 et 8 : Dans le cas où le courant maximal demandé I_{elem_max} est supérieur au courant maximal dans une cellule I_{sc_max} , il est indispensable d'ajouter des branches en parallèle. Le nombre de cellules en série est obtenu en tenant compte de la contrainte sur la tension du pack (Cf. relation v-30). Le nombre de cellules en parallèle est alors déterminé de manière à concilier la limite en courant du composant et la fourniture énergétique.

$$Np_{sc1} \geq \frac{N_{elem}}{Ns_{sc}} \quad \text{V-32}$$

$$Np_{sc2} \geq \frac{I_{elem_max}}{I_{sc_max}} \quad \text{V-33}$$

$$Np_{sc} = \max(Np_{sc1}, Np_{sc2}) \quad \text{V-34}$$

Etape 9 : Vérification par rapport à la masse minimum

Le dimensionnement est réalisé à partir des données d'une cellule, dont les caractéristiques (listées sur la Figure V-3) sont renseignées au préalable. Il est effectué séquentiellement pour toutes les cellules choisies et le dimensionnement retenu correspond au pack dont la masse est la plus faible.

Etape 10 : Détermination des résultats du dimensionnement

Les données de sortie sont les grandeurs suivantes : N_{sc} (produit de Ns_{sc} par Np_{sc}), R_{pack} (Cf. équation v-20), C_{pack} (Cf. équation v-19), I_{pack_max} (Cf. équation v-21), U_{pack} (Cf. équation v-22), m_{pack} et vol_{pack} . Les masse et volume du pack sont obtenus comme suit :

$$m_{pack} = N_{sc} \cdot m_{sc} \quad \text{V-35}$$

$$vol_{pack} = N_{sc} \cdot vol_{sc} \quad \text{V-36}$$

1.2 DIMENSIONNEMENT D'UNE BATTERIE D'ACCUMULATEURS

Avant d'aborder leur dimensionnement, quelques généralités sur les caractéristiques énergétiques et électriques des accumulateurs électrochimiques et des batteries d'accumulateurs sont rappelées. Ensuite, une méthode de dimensionnement est présentée. Habituellement, le dimensionnement d'une batterie d'accumulateurs est réalisé par rapport à sa capacité de stockage, en considérant comme contrainte le courant de décharge. Certains auteurs [79], [81] proposent de considérer également la contrainte liée à la recharge de la batterie, le courant de charge étant inférieur au courant de décharge. Dans cette application, les SSE sont particulièrement sollicités en décharge, en début de mission, c'est pourquoi la méthode de dimensionnement détaillée dans ce paragraphe est basée sur l'énergie stockée et le courant de décharge comme contrainte.

1.2.1 GENERALITES SUR LES CARACTERISTIQUES ENERGETIQUES D'UN ACCUMULATEUR

En complément des grandeurs caractéristiques données en I.3.1.2, les caractéristiques énergétiques d'un accumulateur électrochimique sont détaillées dans ce paragraphe. Pour faciliter la compréhension, les grandeurs présentées ci-après sont rapportées au modèle quasi-statique de l'accumulateur (Cf. Figure V-4).

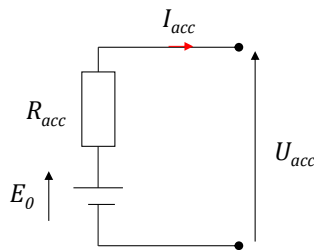


FIGURE V-4 : MODELE D'UN ACCUMULATEUR (MODELE QUASI-STATIQUE)

La convention utilisée est la suivante : lorsque la puissance est positive, l'accumulateur se décharge et restitue de l'énergie ; lorsque la puissance est négative, il se charge et emmagasine de l'énergie.

Puissance dans un accumulateur

La puissance dans un accumulateur peut être exprimée par le produit entre la tension à ses bornes et le courant le traversant, comme suit :

$$P_{acc} = U_{acc} \cdot I_{acc} \quad \text{V-37}$$

L'application de la loi de Kirchhoff à la Figure V-4 donne la relation suivante :

$$U_{acc} = E_0 - R_{acc} \cdot I_{acc} \quad \text{V-38}$$

Exprimée en puissance et en intégrant l'équation v-37, cette relation peut s'écrire également :

$$R_{acc} \cdot I_{acc}^2 - E_0 \cdot I_{acc} + P_{acc} = 0 \quad \text{V-39}$$

Cette équation du second ordre admet deux solutions si son déterminant est positif, c'est-à-dire si :

$$\Delta = E_0^2 - 4R_{acc} \cdot P_{acc} > 0 \quad \text{V-40}$$

La solution à l'équation v-39 est la suivante :

$$I_{acc} = \frac{E_0}{2R_{acc}} - \frac{1}{2R_{acc}} \sqrt{E_0^2 - 4R_{acc} \cdot P_{acc}} \quad \text{V-41}$$

1.2.2 CARACTERISTIQUES D'UNE BATTERIE D'ACCUMULATEURS

En Figure V-5 est présenté le modèle d'une batterie d'accumulateurs obtenu à partir du modèle quasi-statique d'une cellule d'accumulateur. Les équations V-42, V-43, V-75, V-45 et V-46 établissent les relations entre les grandeurs d'une cellule et celles de la batterie, résultant de l'association de $N_{s_{acc}}$ cellules en série et $N_{p_{acc}}$ cellules en parallèle.

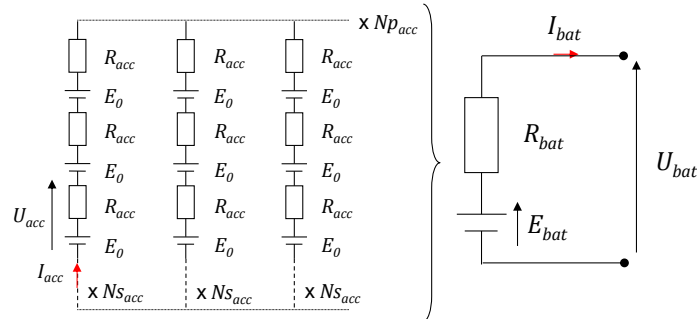


FIGURE V-5 : MODELE D'UNE BATTERIE D'ACCUMULATEURS

$$C_{bat} = N_{p_{acc}} \cdot C_{acc} \quad \text{V-42}$$

$$E_{bat} = N_{s_{acc}} \cdot E_0 \quad \text{V-43}$$

$$R_{bat} = \frac{N_{s_{acc}}}{N_{p_{acc}}} \cdot R_{acc} \quad \text{V-44}$$

$$I_{bat} = N_{p_{acc}} \cdot I_{acc} \quad \text{V-45}$$

$$U_{bat} = N_{s_{acc}} \cdot U_{acc} \quad \text{V-46}$$

$$N_{acc} = N_{s_{acc}} \cdot N_{p_{acc}} \quad \text{V-47}$$

L'énergie et la puissance d'une batterie d'accumulateurs sont obtenues respectivement par la somme de l'énergie et de la puissance des N_{acc} cellules composant la batterie.

$$W_{bat} = N_{acc} \cdot W_{acc} \quad \text{V-48}$$

$$P_{bat} = N_{acc} \cdot P_{acc} \quad \text{V-49}$$

1.2.3 METHODE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE BATTERIE D'ACCUMULATEURS

Le dimensionnement d'une batterie d'accumulateurs consiste à déterminer la cellule d'accumulateur adéquate et le nombre de cellules nécessaire pour satisfaire les besoins énergétiques demandés à cette source, tout en respectant les contraintes imposées par son environnement et liées à ses limites technologiques intrinsèques.

Les données d'entrée pour dimensionner une batterie d'accumulateurs sont en premier lieu les performances énergétiques attendues, et particulièrement l'énergie que la batterie peut restituer. Pour une batterie, la notion de profondeur de décharge est associée à l'énergie utile et à ce titre, fait partie des données d'entrée. De plus, les contraintes susceptibles de s'exercer sur la batterie sont prises en compte. Il s'agit de contraintes électriques (courant maximal en décharge, tension aux bornes de la batterie, ...).

Les résultats du dimensionnement sont : le nombre de cellules constituant la batterie (leur association en série et en parallèle), les performances de la batterie telle que dimensionnée (énergie et puissance maximale) et les caractéristiques électriques ou autres (capacité totale, résistance interne, masse, volume, ...).

L'objectif du dimensionnement est de déterminer le nombre de cellules en série et en parallèle, mais également de déterminer la cellule unitaire la plus appropriée en fonction d'un critère à définir. L'algorithme de dimensionnement est donc réalisé de manière à déterminer la solution optimale correspondant à la minimisation du critère choisi qui, dans notre cas, est la masse.

L'algorithme proposé en Figure V-6 décrit séquentiellement le dimensionnement d'une batterie d'accumulateurs. Les étapes du dimensionnement sont détaillées ci-après.

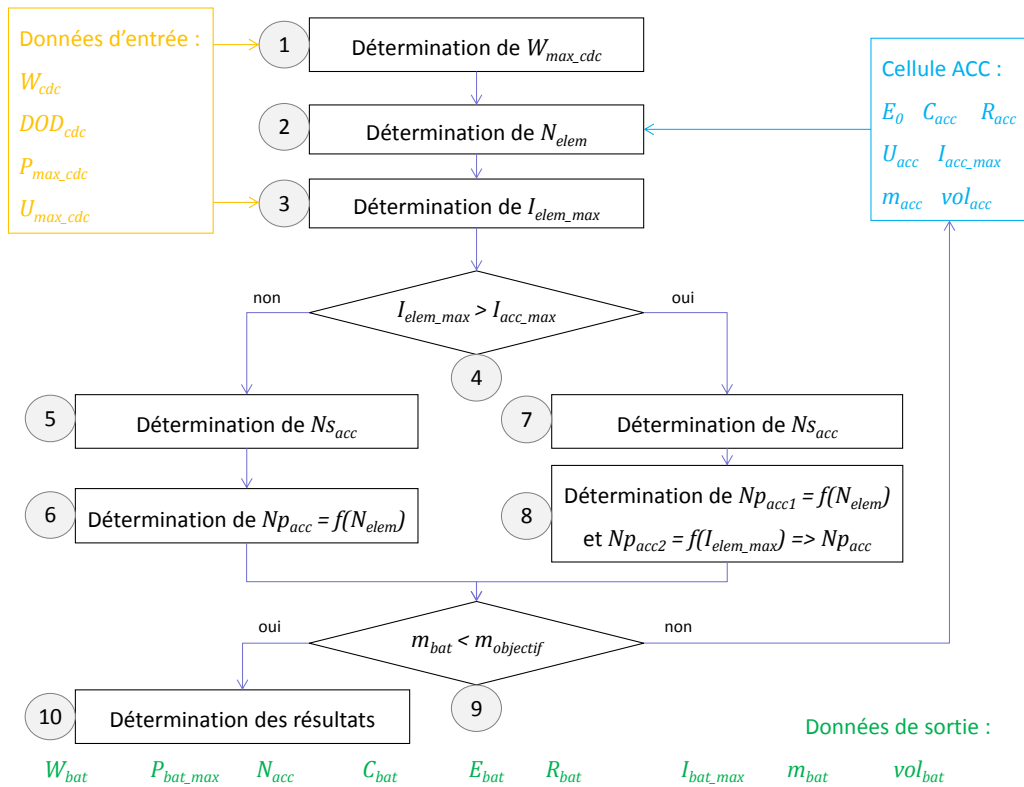


FIGURE V-6 : ALGORIGRAMME DE DIMENSIONNEMENT D'UNE BATTERIE D'ACCUMULATEURS

Etape 1 : Détermination de l'énergie maximale W_{max_cdc} à partir de l'énergie demandée

L'énergie demandée W_{cdc} est l'énergie utile. Pour rappel, l'énergie utile pour un accumulateur peut s'exprimer en fonction de l'énergie maximale W_{acc} (Cf. relation 1-19), selon la relation v-50 où DOD est la profondeur de décharge [%], en considérant la tension à vide E_0 constante. Le dimensionnement de la batterie s'effectue à partir de l'énergie maximale stockée, dont l'expression en fonction de l'énergie demandée est donnée en v-51.

$$DOD = \frac{W_{acc_utile}}{W_{acc}} \quad \text{V-50}$$

$$W_{max_cdc} = \frac{W_{cdc}}{DOD} \quad \text{V-51}$$

Etape 2 : Détermination du nombre d'éléments nécessaire pour fournir l'énergie W_{cdc}

Le nombre d'éléments N_{elem} est le rapport entre l'énergie maximale demandée W_{max_cdc} et l'énergie maximale W_{acc} (Cf. relation 1-19) que peut fournir une cellule.

$$N_{elem} = \frac{W_{max_cdc}}{W_{acc}} = \frac{W_{max_cdc}}{C_{acc} \cdot E_0} \quad \text{V-52}$$

Etape 3 : Détermination du courant maximum dans un élément I_{elem_max}

Le courant maximum dans un élément dépend du nombre d'éléments déterminé précédemment et de la puissance maximale demandée à la batterie P_{max_cdc} . L'expression du courant ci-dessous est issue de la relation v-41 :

$$I_{elem_max} = \frac{E_0}{2R_{acc}} - \frac{1}{2N_{elem} \cdot R_{acc}} \sqrt{(N_{elem} \cdot E_0)^2 - 4N_{elem} \cdot R_{acc} \cdot P_{max_cdc}} \quad \text{V-53}$$

Etape 4 : Vérification par rapport au courant maximal admissible dans une cellule

Le courant I_{elem_max} correspond au courant maximal à fournir pour respecter le cahier des charges. Il est nécessaire de vérifier si ce courant est compatible avec les limites de la cellule unitaire, à savoir I_{acc_max} .

Etapas 5 et 6 : Dans le cas où le courant maximal demandé I_{elem_max} est inférieur au courant maximal dans une cellule I_{acc_max} , on détermine les nombres de cellules en parallèle Np_{acc} et en série Ns_{acc} de la manière suivante : tout d'abord, le nombre de cellules en série est déterminé en tenant compte de la contrainte sur la tension de la batterie exprimée en v-54. Puis le nombre de cellules en parallèle est obtenu à partir de N_{elem} et de Ns_{acc} .

$$U_{bat} = Ns_{acc} \cdot (E_0 - R_{acc} \cdot I_{elem}) \leq U_{max_cdc} \quad \forall I_{elem} \quad \text{V-54}$$

$$Ns_{acc} \leq \frac{U_{max_cdc}}{E_0} \quad \text{V-55}$$

$$Np_{acc} \geq \frac{N_{elem}}{Ns_{acc}} \quad \text{V-56}$$

Etapas 7 et 8 : Dans le cas où le courant maximal demandé I_{elem_max} est supérieur au courant maximal dans une cellule I_{acc_max} , il est indispensable d'ajouter des branches en parallèle. Le nombre de cellules en série est obtenu en tenant compte de la contrainte sur la tension de la batterie (Cf. équation v-54). Le nombre de cellules en parallèle est alors déterminé de manière à concilier l'exigence liée à la puissance (courant maximum) et celle liée à l'énergie (nombre de cellules nécessaire pour fournir l'énergie demandée).

$$Np_{acc1} \geq \frac{I_{elem_max}}{I_{acc_max}} \quad \text{V-57}$$

$$Np_{acc2} \geq \frac{N_{elem}}{Ns_{acc}} \quad \text{V-58}$$

$$Np_{acc} = \max(Np_{acc1}, Np_{acc2}) \quad \text{V-59}$$

Etape 9 : Vérification par rapport à la masse minimum

Le dimensionnement est réalisé à partir des données d'une cellule, dont les caractéristiques (listées sur la Figure V-6) sont renseignées au préalable. Il est effectué séquentiellement pour toutes les cellules choisies et le dimensionnement retenu correspond à la batterie dont la masse est la plus faible.

Etape 10 : Détermination des résultats du dimensionnement

Les données de sortie sont les grandeurs suivantes : N_{acc} (produit de Ns_{acc} par Np_{acc}), C_{bat} (Cf. équation v-42), E_{bat} (Cf. équation v-43), R_{bat} (Cf. équation v-44), I_{bat_max} (Cf. équation v-45), U_{bat} (Cf. équation v-46), m_{bat} et vol_{bat} . Les masse et volume de la batterie sont obtenus comme suit :

$$m_{bat} = N_{acc} \cdot m_{acc} \quad \text{V-60}$$

$$vol_{bat} = N_{acc} \cdot vol_{acc} \quad \text{V-61}$$

1.3 DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DE LA POUTRE

Le dimensionnement des éléments de stockage dépend de leur association. Plusieurs façons d'associer des SSE sont rappelées dans un premier temps, avant de présenter les deux associations retenues dans cette application.

1.3.1 HYBRIDATION / ASSOCIATION D'ELEMENTS DE STOCKAGE

Il existe diverses manières d'associer des SSE et de les connecter à un réseau [82]. Trois d'entre elles sont présentées et commentées ci-dessous.

La première façon d'associer des SSE est l'hybridation directe où les sources sont connectées directement à un bus continu, en parallèle (Cf. Figure V-7, a). Dans ce cas, la tension aux bornes des moyens de stockage est identique à celle du bus et sa variation suit celle du bus sur l'intervalle de tension autorisé (souvent restreint). De fait, il est difficile d'exploiter les sources de manière optimale, leur plage de fonctionnement étant réduite et dépendante de celles des autres sources connectées. Ce type d'association est utilisé pour des applications à faible coût et pour lesquelles le contrôle des sources n'est pas fondamental. Enfin, pour une association directe en parallèle, les éléments de stockage hybridés présentent généralement des caractéristiques complémentaires. Le but est alors de répartir les besoins énergétiques entre les sources, bien qu'il n'y ait pas de moyens de réglage direct (convertisseurs), en comptant sur la différence d'impédance des sources.

La deuxième manière est de connecter un seul des SSE directement au bus et de relier les autres via un convertisseur (Cf. Figure V-7, b). Ce principe, plus flexible que le premier énoncé, est utilisé dans le cas de figure où une des sources est choisie pour fixer la tension du bus et fournir une puissance moyenne ; les autres sources sont alors secondaires d'un point de vue fonctionnel. Cette topologie autorise la variation de tension des sources associées aux convertisseurs, ce qui permet une meilleure exploitation de ces composants. Dans certains cas, l'association d'une des sources avec un convertisseur est indispensable pour bénéficier d'un grand rapport de conversion et faire fonctionner la source à un niveau de tension optimal. De plus, le convertisseur peut éventuellement apporter une fonction d'isolation galvanique et permet le découplage des sources. Enfin cette structure peut être utilisée pour préserver une source de conditions de fonctionnement qui lui seraient défavorables et qui pourraient dégrader sa durée de vie (par exemple pour éviter le cyclage intempestif d'un accumulateur).

Enfin la troisième manière d'associer des éléments de stockage est de réaliser une hybridation au travers de convertisseurs pour chacun d'entre eux (Cf. Figure V-7, c). Cette topologie est la plus flexible dans la mesure où chaque élément de stockage peut être exploité à son point de fonctionnement nominal. Ce type de structure est utilisé pour des systèmes qui nécessitent un contrôle de chaque source et pour lesquels une gestion de l'énergie est développée. En outre, les avantages liés à l'association d'une source avec un convertisseur dédié sont valables dans ce cas pour chacun des moyens de stockage. Autrement dit, on peut autoriser une variation de tension aux bornes des SSE plus grande que l'intervalle de tolérance de la tension du bus, on peut si besoin isoler galvaniquement les SSE du bus et enfin on peut maîtriser l'utilisation de chacun des SSE en fonction de ses particularités (point de fonctionnement optimal, aptitude au cyclage, ...).

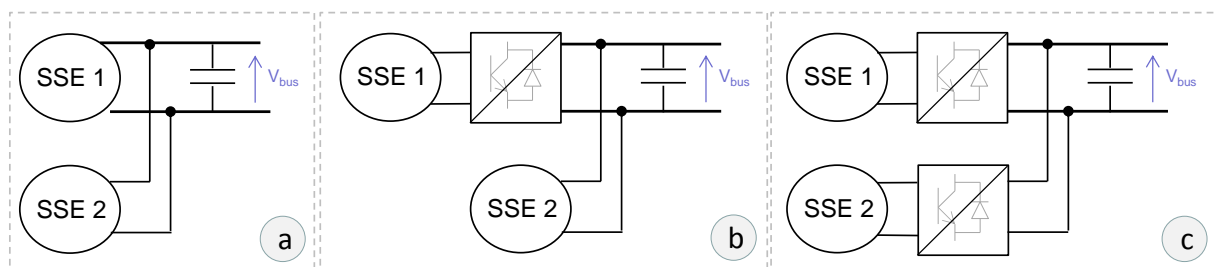


FIGURE V-7 : DIFFERENTES TOPOLOGIES POUR L'HYBRIDATION D'ELEMENTS DE STOCKAGE

1.3.2 ASSOCIATION D'ÉLÉMENTS DE STOCKAGE DANS LA POUTRE ÉLECTRIQUE

Dans notre application, deux associations de SSE sont réalisées sur les deux bus continus de la poutre électrique. Dans les deux cas, les éléments de stockage hybridés sont considérés comme une source de puissance et une source d'énergie. En Figure V-8, la Représentation Énergétique Macroscopique de la poutre électrique est donnée (Cf. paragraphe IV.1.2 relatif à l'application de la méthodologie REM à cette application). Sur le bus n°1, l'association est réalisée de manière à contrôler le bus à l'aide de convertisseurs statiques pour chacun des SSE. Sur le bus n°2, les éléments de stockage sont directement connectés au bus, sans convertisseur donc sans moyen de contrôle.

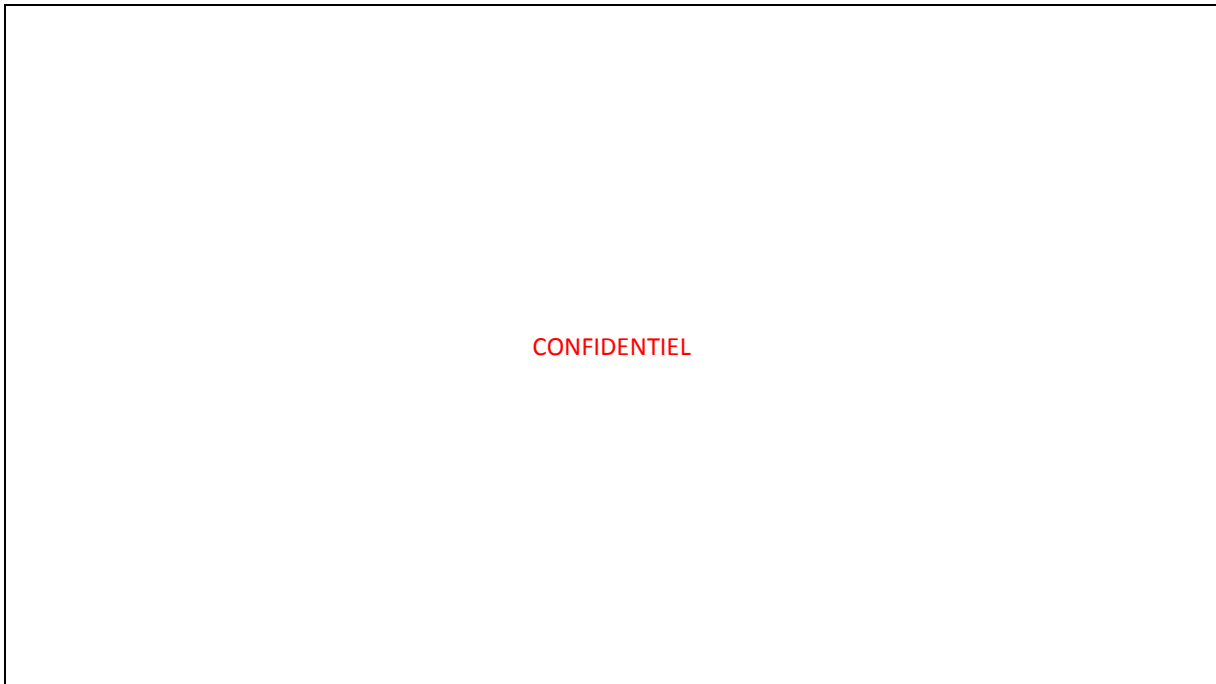


FIGURE V-8 : REM DE LA POUTRE ÉLECTRIQUE EN CONFIGURATION NORMALE

L'architecture de la poutre et la gestion d'énergie ont une influence sur le dimensionnement des éléments de stockage de la poutre.

L'architecture telle que présentée ci-dessus montre que les éléments de stockage du bus n°2 sont directement reliés au bus, sans convertisseur. Leur tension respective est donc égale à la tension du bus n°2. La variation de la tension du bus étant limitée par des contraintes normatives, il en est de même pour la variation de la tension aux bornes des SSE du bus n°2. Par ailleurs, il apparaît que les SSE du bus n°2 sont davantage mis à contribution lorsque les éléments de stockage du bus n°1 sont indisponibles. Cela signifie que sur la période en début de mission où les SSE sont les seules sources en présence, les sources ACC2 et SCAP2 fournissent l'énergie nécessaire à la poutre entière. Par conséquent, le dimensionnement des éléments de stockage du bus n°2 est réalisé dans une configuration « dégradée » (sans les SSE du bus n°1), sur une période en début de mission (pas d'autre source que les SSE) et en tenant compte des variations de tension autorisées sur le bus.

Concernant les éléments de stockage du bus n°1, ils sont reliés au bus via des convertisseurs statiques, ce qui sous-entend une plus grande flexibilité sur la tension à leurs bornes. Cette association avec des convertisseurs permet de contrôler le courant des sources et d'implanter une gestion d'énergie fréquentielle. Le dimensionnement des éléments de stockage du bus n°1 est réalisé en configuration normale sur une période en début de mission, en tenant compte des contraintes liées à l'association avec des convertisseurs.

2 DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DE LA POUTRE ELECTRIQUE

Dans cette deuxième partie, les résultats du dimensionnement des éléments de stockage de la poutre électrique sont présentés. Le dimensionnement des SSE du bus n°1 est développé dans un premier temps, puis celui des SSE du bus n°2 et particulièrement du pack de supercondensateurs SCAP2 est détaillé. L'influence de plusieurs paramètres est étudiée, notamment celle de la gestion d'énergie qui répartit les besoins énergétiques de la poutre entre les éléments de stockage disponibles. L'impact de l'association des SSE et de leur connexion aux bus est également souligné.

2.1 DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DU BUS N°1

Ce paragraphe est dédié au dimensionnement des éléments de stockage du bus n°1, c'est-à-dire de la batterie d'accumulateurs (ACC1) et du pack de supercondensateurs (SCAP1). Avant de développer les résultats issus de l'outil de dimensionnement, les données d'entrée et le critère d'optimisation sont précisés.

2.1.1 INITIALISATION DU DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DU BUS N°1

Les données d'entrée de l'outil de dimensionnement sont les besoins énergétiques de la poutre, autrement dit le profil de charge dimensionnant, les conditions de leur répartition entre les différentes sources (gestion de l'énergie), les contraintes liées à l'architecture (type d'association entre les SSE) et une base de données sur les cellules unitaires.

Profil de charge – Comme indiqué à maintes reprises, les vingt premières minutes du profil de mission sont les plus sollicitant pour les éléments de stockage car, pendant cette durée, ce sont les seules sources en présence. Le profil de charge utilisé pour le dimensionnement des SSE du bus n°1 est composé des profils de charge des deux bus (définis en Figure IV-4), le profil de charge du bus n°2 étant ramené à la tension du bus n°1, et du profil de courant représentatif du démarrage du S/G. L'allure de ce profil de charge établi pour le dimensionnement est donnée en Figure V-9.

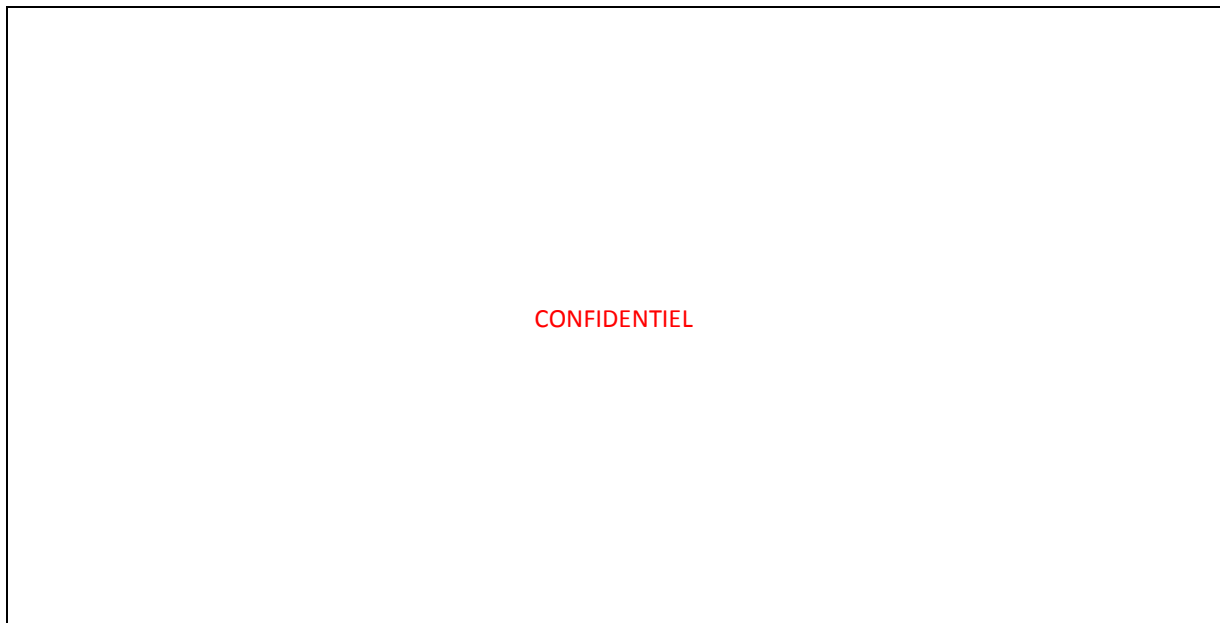


FIGURE V-9 : PROFIL DE CHARGE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DU BUS N°1

Architecture – Les convertisseurs associés aux sources ACC1 et SCAP1 sont du type hacheur élévateur, par conséquent la tension maximale aux bornes des sources doit être inférieure à la tension minimale du bus n°1.

Gestion de l'énergie – La gestion de l'énergie, décrite en IV.1.2, est une gestion fréquentielle des sources. Pour rappel, sur le bus n°1, la puissance de fond est fournie par les S/G, la puissance à dynamique moyenne est fournie par les accumulateurs et la puissance à dynamique élevée est fournie par les supercondensateurs. Le dimensionnement des éléments de stockage tient compte de leur utilisation. Le profil de charge, donné en Figure V-9, est donc réparti entre les deux éléments de stockage, les S/G n'étant pas en génération durant le début de la mission. La répartition se fait entre les SSE en fonction d'un critère dynamique, par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas, comme cela est représenté en Figure V-10. On obtient alors les grandeurs énergétiques nécessaires au dimensionnement des éléments de stockage, à savoir : l'énergie, la puissance maximale, la profondeur de décharge. Ce dernier paramètre est une variable dont l'influence peut être étudiée.

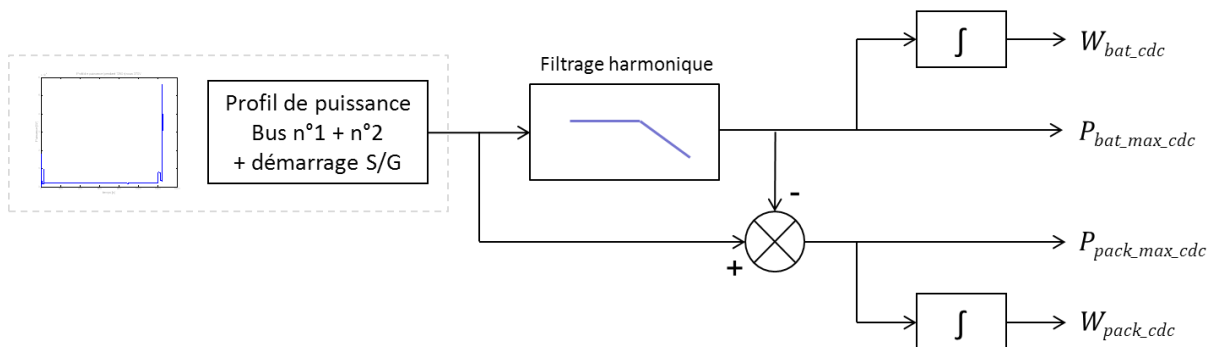


FIGURE V-10 : GESTION FREQUENTIELLE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DU BUS N°1

Base de données Supercondensateurs et Accumulateurs – Les dimensionnements de pack de supercondensateurs et de batterie d'accumulateurs présentés en Figure V-3 et Figure V-6 sont réalisés en considérant des caractéristiques de cellule unitaire. Les bases de données utilisées pour le dimensionnement sont renseignées dans le Tableau V-1 pour les supercondensateurs et le Tableau V-2 pour les accumulateurs. Il s'agit des caractéristiques fournies par les constructeurs, correspondant au modèle standard pour les supercondensateurs et au modèle quasi-statique pour les accumulateurs.

| SCAP | C_{sc} | R_{sc} | U_c | $U_{c,max}$ | $I_{sc,max}$ | m_{sc} | vol_{sc} | Energie spécifique | Puissance spécifique |
|--------|----------|----------|-------|-------------|--------------|----------|--------------------|------------------------|------------------------|
| Unité | [F] | [mΩ] | [V] | [V] | [A] | [g] | [dm ³] | [Wh.kg ⁻¹] | [kW.kg ⁻¹] |
| M650F | 650 | 0,8 | 2,7 | 2,8 | 105 | 200 | 0,15 | 3,29 | 11,4 |
| M1200F | 1200 | 0,58 | 2,7 | 2,8 | 110 | 300 | 0,233 | 4,05 | 10,5 |
| M1500F | 1500 | 0,47 | 2,7 | 2,8 | 115 | 320 | 0,264 | 4,75 | 12,1 |
| M2000F | 2000 | 0,35 | 2,7 | 2,8 | 125 | 400 | 0,312 | 5,06 | 13,0 |
| M3000F | 3000 | 0,29 | 2,7 | 2,8 | 150 | 550 | 0,411 | 5,52 | 11,4 |

TABLEAU V-1 : BASE DE DONNEES POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UN PACK DE SUPERCONDENSATEURS [12]

Les densités d'énergie et de puissance sont données dans le Tableau V-1 pour les cellules de supercondensateurs. L'énergie spécifique est déterminée en appliquant la relation III-1, et la puissance spécifique est calculée suivant la relation III-4.

Les densités d'énergie et de puissance sont également données pour les cellules d'accumulateurs dans le Tableau V-2. L'énergie spécifique est obtenue à partir de la relation I-19 et la densité de puissance à partir de relation V-37.

| ACC | C_{acc} | R_{acc} | E_0 | $U_{acc,max}$ | $I_{acc,max}$ | m_{acc} | vol_{acc} | Energie spécifique | Puissance spécifique |
|---------------|-----------|-----------|-------|---------------|---------------|-----------|--------------------|------------------------|-----------------------|
| Unité | [Ah] | [mΩ] | [V] | [V] | [A] | [g] | [dm ³] | [Wh.kg ⁻¹] | [W.kg ⁻¹] |
| SLPB626495 | 4 | 12 | 3,7 | 4,2 | 8 | 82 | 0,039 | 180 | 361 |
| SLPB68106100 | 8 | 4,5 | 3,7 | 4,2 | 16 | 160 | 0,080 | 185 | 370 |
| SLPB7570270 | 16 | 2 | 3,7 | 4,2 | 32 | 307 | 0,167 | 193 | 386 |
| SLPB803048H5 | 0,8 | 12 | 3,7 | 4,2 | 24 | 23 | 0,013 | 129 | 3860 |
| SLPB834374H | 2 | 8 | 3,7 | 4,2 | 30 | 50 | 0,029 | 148 | 2220 |
| SLPB11043140H | 4,8 | 11 | 3,7 | 4,2 | 96 | 115 | 0,065 | 154 | 3090 |

TABLEAU V-2 : BASE DE DONNEES POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UNE BATTERIE D'ACCUMULATEURS [38]

Pour situer les performances de ces cellules les unes par rapport aux autres, on propose de positionner leurs caractéristiques spécifiques Energie/Puissance sur le diagramme de Ragone établi dans le premier chapitre (Cf. Figure V-11). On constate que les performances énergétiques des cellules retenues pour le dimensionnement sont en bordure des surfaces définies préalablement, ceci s'explique par le fait qu'il s'agit de cellules et que les surfaces ont été établies pour des systèmes. Les performances d'un système composé de n cellules sont inférieures à la somme des performances des n cellules. En effet, les connexions entre les cellules engendrent des résistances supplémentaires et la masse globale intègre la masse des interconnexions électriques et mécaniques, ce qui dégrade les densités de puissance et d'énergie.

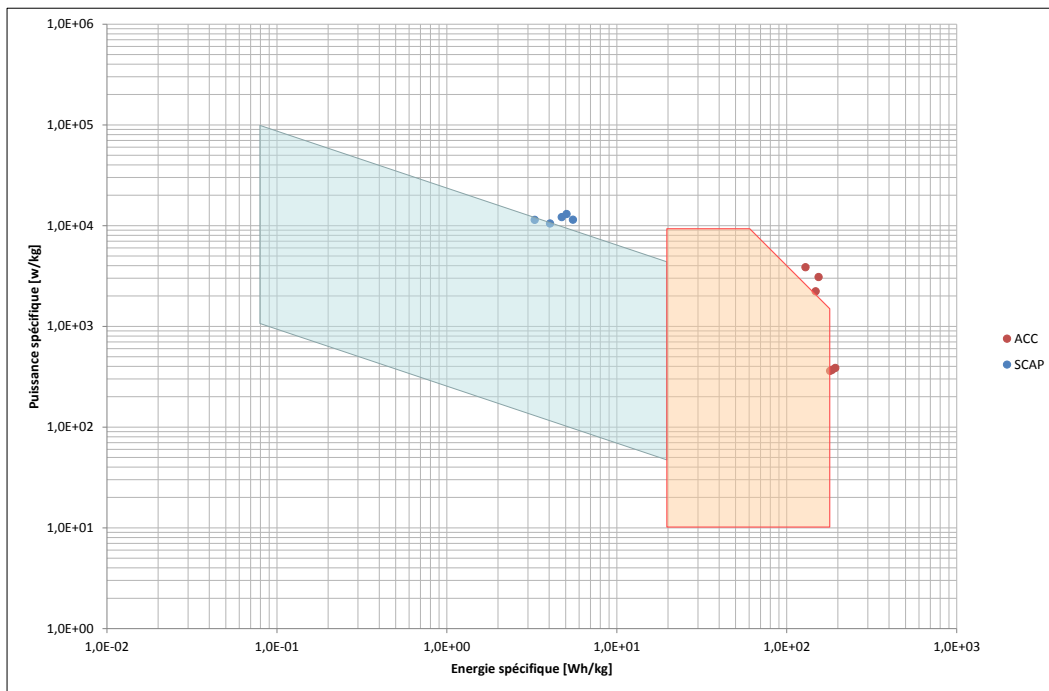


FIGURE V-11 : DIAGRAMME DE RAGONE – CELLULES D'ACCUMULATEUR ET DE SUPERCONDENSATEUR

Enfin, les caractéristiques représentées sur ce diagramme de Ragone peuvent être projetées sur un plan fréquentiel, comme suggéré par Akli [79]. Sur le diagramme en Figure V-12, on positionne les cellules retenues pour le dimensionnement selon une vision fréquentielle. La fréquence [Hz] est obtenue en réalisant le rapport de la puissance spécifique [W.kg⁻¹] par l'énergie spécifique [J.kg⁻¹], comme par exemple, dans la relation v-62 donnée pour une cellule de supercondensateur.

$$f_{sc} = \frac{P_{sc}}{W_{sc}}$$

V-62

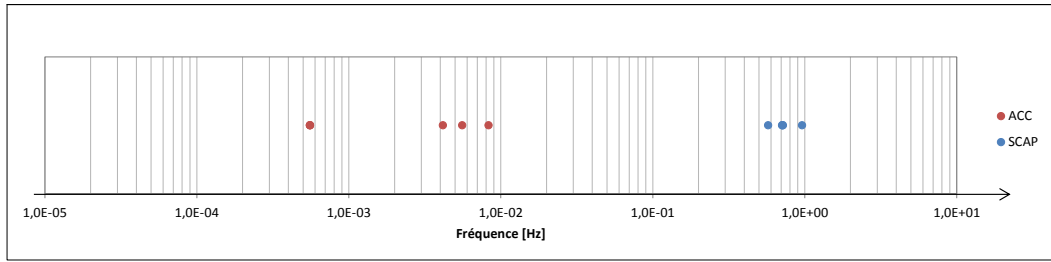


FIGURE V-12 : PROJECTION DU DIAGRAMME DE RAGONE SUR UN PLAN FREQUENTIEL – CELLULES DES SOURCES DU BUS N°1

Critère à minimiser – Pour le dimensionnement des éléments de stockage du bus n°1, le critère à minimiser est la masse. En effet, dans une application aéronautique, la masse embarquée doit être la plus faible possible. L’objectif est donc d’obtenir les meilleures performances pour une masse minimale, c’est-à-dire de rechercher les meilleures densités d’énergie et de puissance pour les deux SSE.

2.1.2 RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement consiste à déterminer quelles sont les cellules unitaires (ACC et SCAP) qui permettent de répondre aux besoins énergétiques (énergie et puissance) et qui constituent des systèmes dont la masse est minimisée.

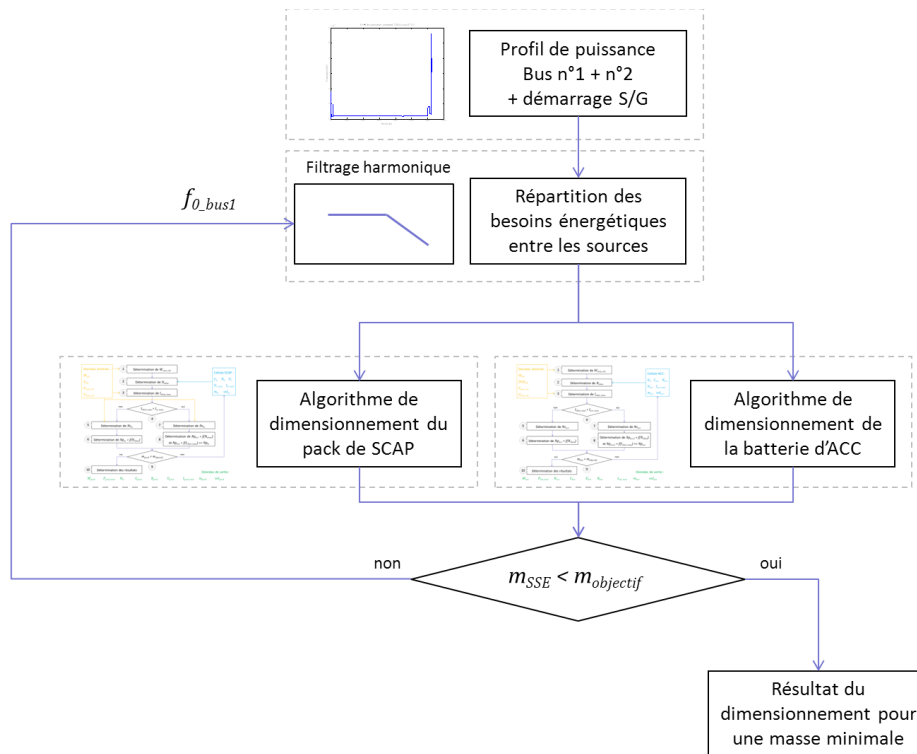


FIGURE V-13 : SYNOPTIQUE DU DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DU BUS N°1

Dans un premier temps, l’influence de la fréquence de coupure f_{0_bus1} du filtre passe-bas est observée. Ensuite, on détermine la fréquence de coupure qui donne lieu à la masse minimale pour l’ensemble des éléments de stockage, selon le synoptique donné en Figure V-13. Enfin, l’influence de la profondeur de décharge des deux sources est commentée.

Influence de la fréquence de coupure – Pour des profondeurs de décharge constantes, on a fait varier la fréquence de coupure du filtre passe-bas. Quelques valeurs sont données dans le Tableau V-3 pour illustrer l’influence de la fréquence de coupure sur les grandeurs puissance et énergie demandées aux SSE.



TABLEAU V-3 : INFLUENCE DE LA FREQUENCE DE COUPURE SUR LES PUISSANCES ET ENERGIES DES SSE DU BUS N°1

La Figure V-14 donne l’allure des grandeurs puissance et énergie des SSE en fonction du temps. Ces courbes sont issues de la gestion fréquentielle, autrement dit, le profil de puissance donné en Figure V-9 est réparti selon la gestion d’énergie décrite en Figure V-10.

Quelle que soit la fréquence de coupure, l’énergie demandée au pack de supercondensateurs (SCAP1) et à la batterie d’accumulateurs (ACC1) est constante, cette énergie correspond à l’énergie demandée par l’ensemble des charges de la poutre électrique. La répartition de l’énergie s’effectue bien entre les deux sources SCAP1 et ACC1 mais de manière différente selon la fréquence de coupure. Plus la fréquence de coupure est élevée, plus la batterie ACC1 est sollicitée en énergie et en puissance. Pour une fréquence de coupure de 1mHz, la masse totale des SSE est élevée à cause de la source SCAP1. En effet, le nombre de cellules de supercondensateur est d’autant plus élevé que l’énergie demandée au pack est grande.

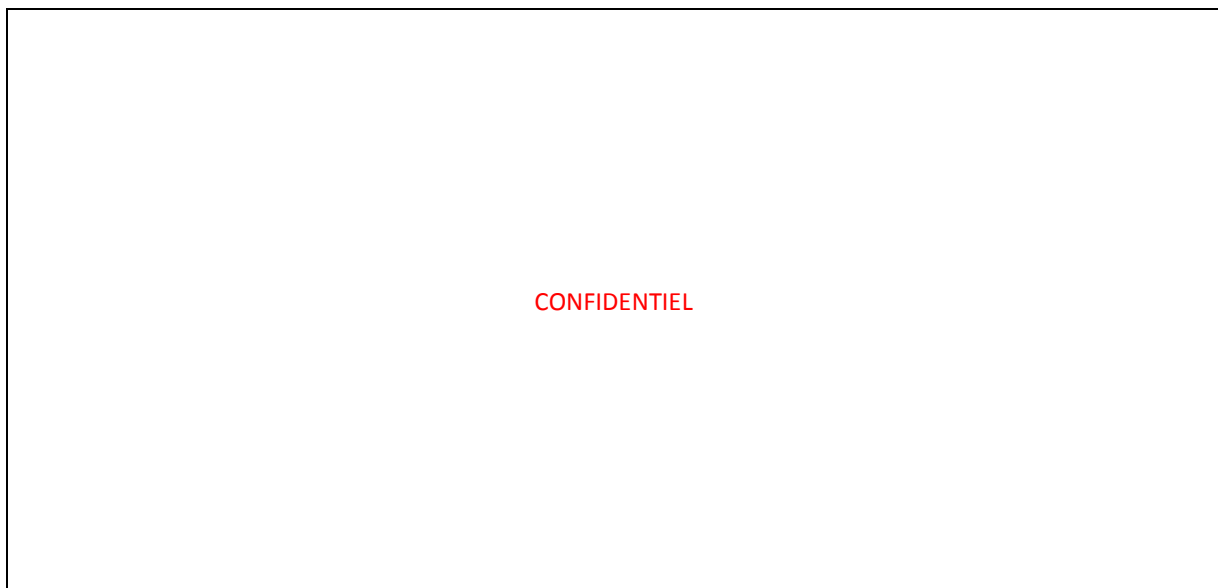


FIGURE V-14 : PUISSANCE ET ENERGIE DES SSE DU BUS N°1 SUIVANT LA GESTION ENERGETIQUE FREQUENTIELLE

Minimisation de la masse en fonction de la fréquence de coupure – On cherche à déterminer la fréquence de coupure pour laquelle la masse des éléments de stockage est minimale. Pour cela, on balaye une plage de fréquence assez restreinte (bornée par rapport à la projection des performances des cellules sur le plan fréquentiel) avec un pas de 1mHz. Pour une fréquence comprise entre 5mHz et 10mHz, la masse est minimale (Cf. Figure V-15). En-deçà de cette plage de fréquence, le pack de supercondensateurs est dimensionné par rapport à l’énergie demandée, qui est conséquente. Plus la fréquence de coupure est élevée, plus l’énergie demandée au pack diminue. Au-delà de 10mHz, l’énergie demandée au pack diminue tandis que la puissance

demandée reste élevée. Le dimensionnement du pack est alors imposé par la puissance et le nombre de cellules en parallèle augmente en conséquence.

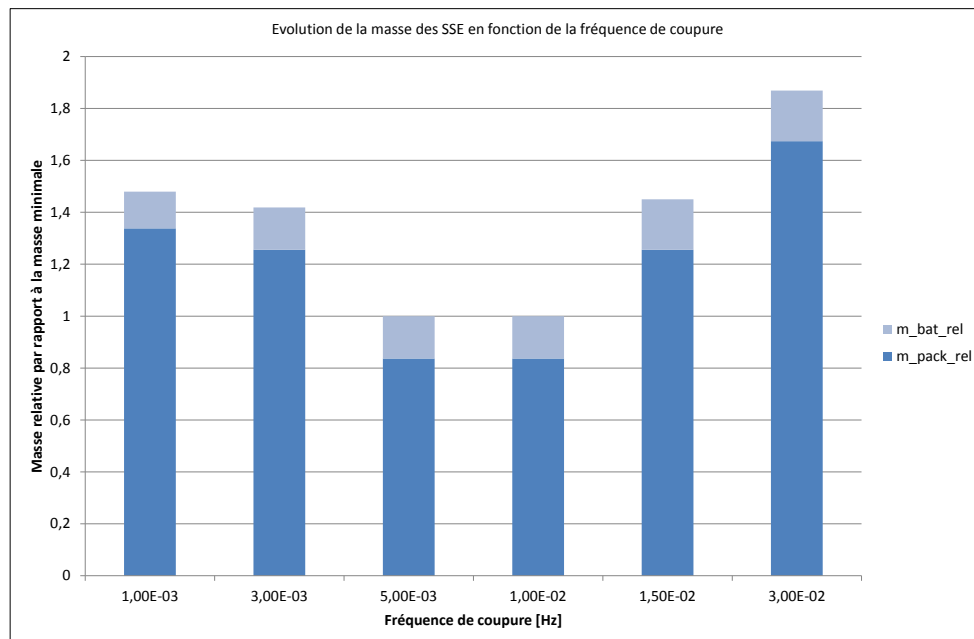


FIGURE V-15 : EVOLUTION DE LA MASSE DES SSE DU BUS N°1 EN FONCTION DE LA FREQUENCE DE COUPURE

Influence de la profondeur de décharge – Pour les résultats présentés ci-dessus, les profondeurs de décharge autorisées pour les sources sont de 75%. Les éléments de stockage du bus n°1 étant connectés au bus via des convertisseurs, leur tension peut varier de manière importante sans que cela impacte la tension du bus. Pour les supercondensateurs, la tension à leurs bornes varie de la tension nominale à la moitié de celle-ci. Plus la profondeur de décharge autorisée est faible, plus la masse des SSE est élevée.

CONFIDENTIEL

Résultats du dimensionnement –

CONFIDENTIEL

Une validation du dimensionnement réalisé dans ce paragraphe est proposée dans une quatrième partie. Il s'agit d'évaluer le dimensionnement par une simulation du fonctionnement des SSE en réponse au profil de charge, en utilisant les modèles des cellules développés dans les chapitres II et III.

2.2 DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DU BUS N°2

Ce paragraphe est consacré au dimensionnement des éléments de stockage du bus n°2 et plus particulièrement à celui du pack de supercondensateurs (SCAP2). Avant de développer les résultats issus de l'outil de dimensionnement, les données d'entrée et le critère d'optimisation sont précisés.

2.2.1 INITIALISATION DU DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DU BUS N°2

Les données d'entrée de l'outil de dimensionnement sont le profil de charge dimensionnant, les contraintes liées à l'architecture (type d'association entre les SSE) et une base de données sur les cellules unitaires.

Profil de charge – Le profil de charge utilisé pour le dimensionnement des SSE du bus n°2 est le même que celui défini pour le dimensionnement des éléments de stockage du bus n°1, c'est-à-dire un profil composé des courants de charge des deux bus et du courant de démarrage d'un S/G, ramenés à la même tension, pendant vingt minutes. L'allure de ce profil de charge est donnée en Figure V-16.

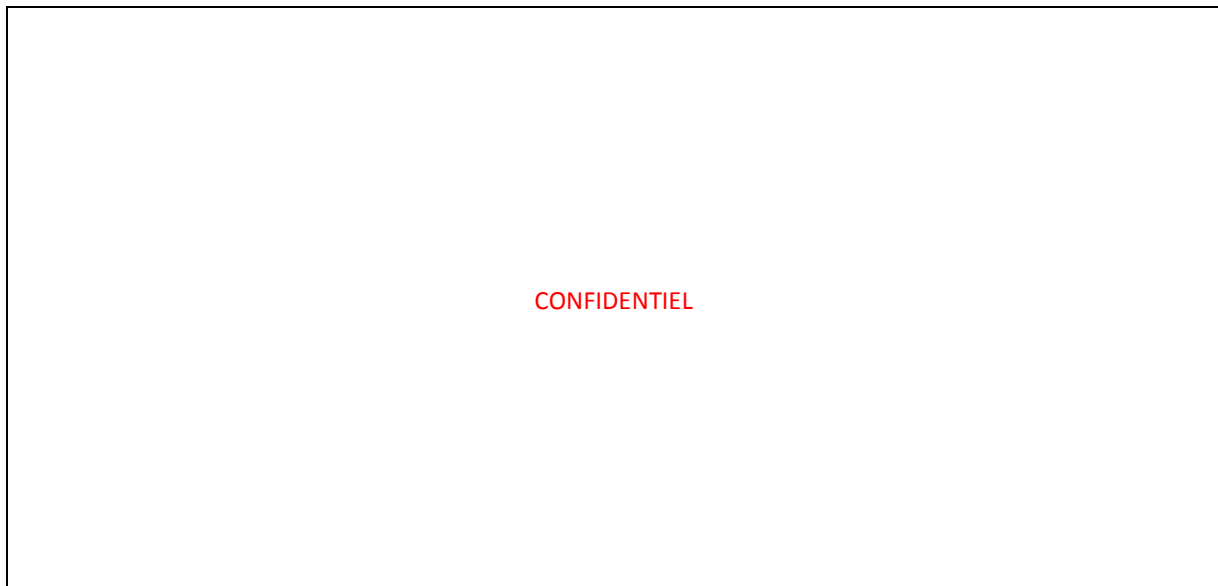


FIGURE V-16 : PROFIL DE CHARGE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DU BUS N°2

Architecture – Comme indiqué au paragraphe V.1.3.2, les éléments de stockage sont reliés directement au bus n°2, par conséquent leur tension est identique à celle du bus n°2.

Gestion de l'énergie – En mode dégradé (sans les SSE du bus n°1), la tension du bus n°2 est flottante et les éléments de stockage sont sollicités en début de profil de mission. Les besoins énergétiques de la poutre sont répartis entre les deux SSE de manière non contrôlée et sur la seule différence d'impédance entre les sources. Néanmoins, pour dimensionner les SSE du bus n°2, on peut considérer une gestion fréquentielle.

La batterie d'accumulateurs du bus n°2 a déjà été dimensionnée au préalable car elle équipe bon nombre d'aéronefs. Elle est intégrée dans l'outil de dimensionnement. La puissance demandée par les charges est alors répartie entre les deux sources selon un critère dynamique : d'une part, la puissance à dynamique lente est fournie par la batterie d'accumulateurs. Cette répartition s'effectue par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas, comme le montre la Figure V-17. La fréquence de coupure du filtre est déterminée de façon à éviter une décharge trop grande de la batterie d'accumulateurs ACC2. D'autre part, la puissance à dynamique élevée est « attribuée » au pack de supercondensateurs SCAP2. La puissance et l'énergie sont les données d'entrée pour son dimensionnement. L'intervalle de tension défini ci-dessus correspond à un ratio de 0,8 (égal au rapport de

la tension minimale sur la tension maximale), donc à une profondeur de décharge autorisée de 36% pour le pack de supercondensateurs.

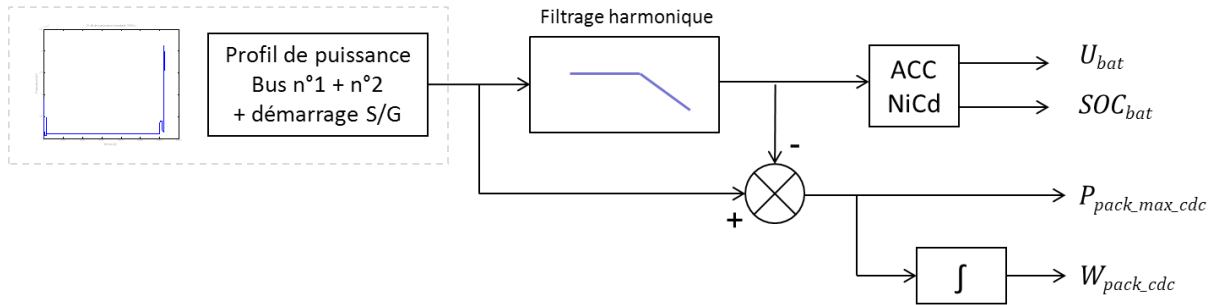


FIGURE V-17 : GESTION FREQUENTIELLE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE DU BUS N°2

Base de données Supercondensateurs et Accumulateurs – Le dimensionnement de la source SCAP2 présenté en Figure V-3 est réalisé en considérant des caractéristiques de cellule unitaire. La base de données, pour les supercondensateurs, utilisée pour ce dimensionnement est identique à celle renseignée dans le Tableau V-1. La notion de fréquence associée aux densités d'énergie et de puissance est applicable à cette batterie. Elle est définie comme suit :

$$f_{acc} = \frac{P_{acc}}{W_{acc}} \quad \text{V-63}$$

Avec : f_{acc} : fréquence liée aux densités de puissance et d'énergie de la batterie [Hz]

P_{acc} : puissance de la batterie [W] (ou puissance spécifique [W.kg⁻¹])

W_{acc} : énergie de la batterie [J] (ou énergie spécifique [J.kg⁻¹])

Ces valeurs puissance et énergie correspondent à la batterie complète, donc à un système. Ces performances sont donc à relativiser par rapport aux performances d'une cellule unitaire. Ces caractéristiques peuvent être positionnées sur un diagramme de Ragone ou sur un plan fréquentiel comme proposé en Figure V-18.

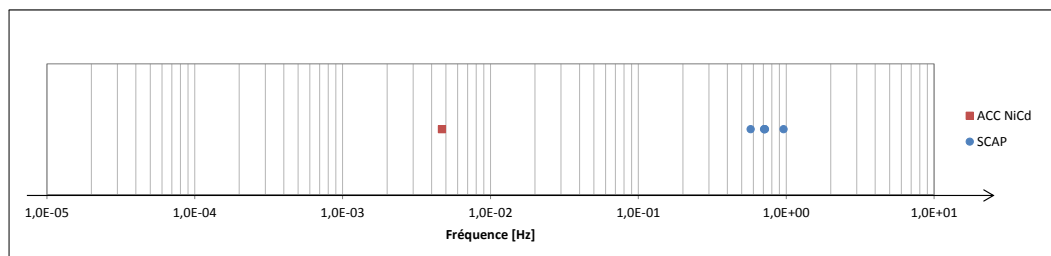


FIGURE V-18 : PROJECTION DU DIAGRAMME DE RAGONE SUR UN PLAN FREQUENTIEL – CELLULES DES SOURCES DU BUS N°2

Critère de minimisation – Le critère de minimisation retenu pour le dimensionnement du pack de supercondensateurs du bus n°2 est la masse.

2.2.2 RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT

Dans un premier temps, l'influence de la fréquence de coupure f_{0_bus2} du filtre passe-bas est observée. Ensuite, on détermine la fréquence de coupure qui donne lieu à la masse minimale pour le pack de supercondensateurs et pour laquelle la batterie d'accumulateurs est utilisée dans des conditions normales.

Influence de la fréquence de coupure – Pour différentes fréquences de coupure du filtre passe-bas, on relève les puissances et énergies demandées à chacune des sources. Quelques valeurs sont données à titre d'exemple dans le Tableau V-4.



TABLEAU V-4 : INFLUENCE DE LA FREQUENCE DE COUPURE SUR LES PUISSANCES ET ENERGIES DES SSE DU BUS N°2

Quelle que soit la fréquence de coupure, l'énergie demandée à la batterie d'accumulateurs (ACC2) et au pack de supercondensateurs (SCAP2) est constante. La répartition de l'énergie s'effectue entre les deux sources mais de manière différente selon la fréquence de coupure. Plus la fréquence de coupure est élevée, moins la source SCAP2 est sollicitée en énergie.

La Figure V-19 donne l'allure des grandeurs puissance et énergie des SSE en fonction du temps. Ces courbes sont issues de la gestion fréquentielle, autrement dit, le profil de puissance donné en Figure V-16 est réparti selon la gestion d'énergie décrite en Figure V-17. Les évolutions de la tension aux bornes de la source ACC2 et de son état de charge sont également suivies pour s'assurer que la batterie est utilisée dans des conditions de fonctionnement normales.

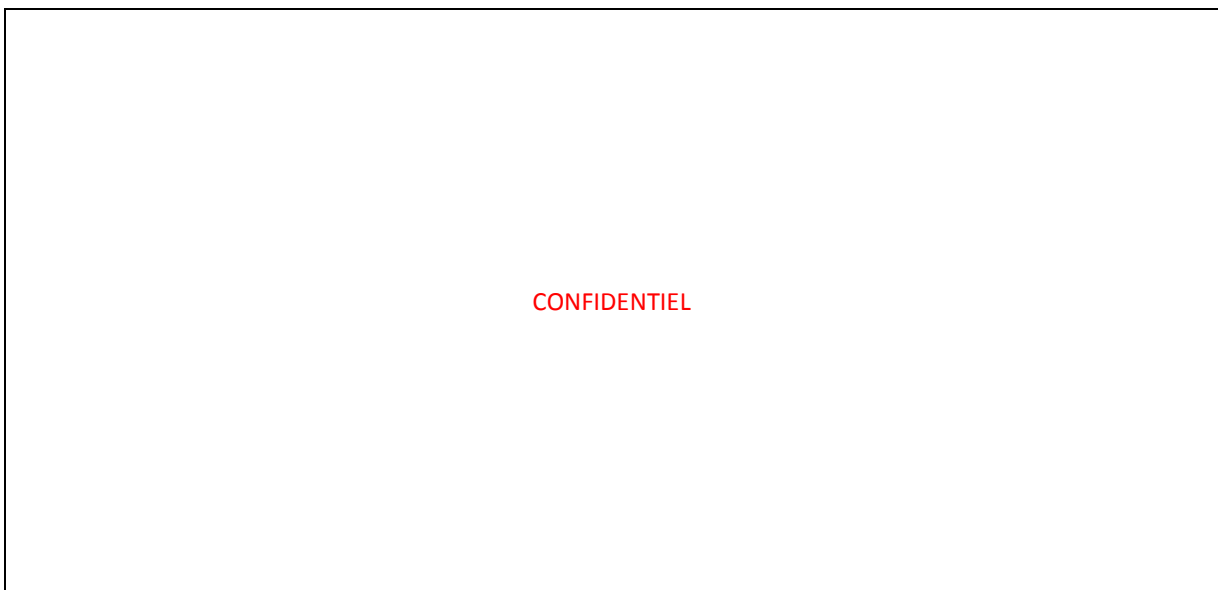


FIGURE V-19 : PUISSANCE ET ENERGIE DES SSE DU BUS N°2 SUIVANT LA GESTION ENERGETIQUE FREQUENTIELLE

Minimisation de la masse en fonction de la fréquence de coupure – On cherche à déterminer la fréquence de coupure pour laquelle la masse du pack de supercondensateurs est minimale, tout en s'assurant que la batterie est déchargée dans des conditions normales. On fixe pour la source ACC2 une tension minimum en dessous de laquelle on ne souhaite pas descendre. Cette tension minimum est égale à la tension minimale autorisée sur le bus n°2. Pour une fréquence de 5mHz, la masse est minimale et la tension aux bornes de la batterie atteint la valeur minimale autorisée à la fin du profil. En-deçà de cette fréquence, le pack de supercondensateurs est dimensionné par rapport à l'énergie demandée. Au-delà de cette fréquence, l'énergie demandée au pack est de plus en plus faible tandis que l'énergie demandée à la batterie est de plus en plus élevée et la tension à ses bornes chute en dessous de la valeur minimale autorisée.

Résultats du dimensionnement –

CONFIDENTIEL

Pour réaliser ce dimensionnement, on a considéré pour les deux sources directement en parallèle une répartition identique à la répartition entre deux sources via des convertisseurs, c'est-à-dire une répartition fréquentielle. Dans le cas de deux sources connectées au bus par l'intermédiaire de convertisseurs, la répartition fréquentielle est réalisée au niveau de la commande des sources. Dans le cas de deux sources directement connectées au bus, la répartition ne peut être faite par la commande. L'hypothèse prise dans ce paragraphe, relative à une répartition équivalente à une répartition fréquentielle, se justifie par le fait que les constantes de temps des deux sources sont intrinsèquement différentes. Une validation de cette hypothèse est proposée dans une quatrième partie. Il s'agit d'évaluer le dimensionnement par une simulation du fonctionnement des SSE du bus n°2 en réponse à une variation de la tension du bus, en utilisant les modèles des cellules développés dans les chapitres II et III.

Pour conclure cette deuxième partie, l'influence de la gestion fréquentielle sur le dimensionnement des éléments de stockage est importante. Il est donc tout à fait nécessaire d'intégrer la gestion de l'énergie dès le dimensionnement d'un système. En outre, la profondeur de décharge est un paramètre variable pour les SSE du bus n°1, contrairement aux SSE du bus n°2 pour lesquels la tension aux bornes est limitée. La connexion directe à un bus implique un surdimensionnement des éléments de stockage car leur profondeur de décharge est faible. En ce qui concerne les SSE connectés via des convertisseurs à un bus, le bilan sur la masse doit intégrer la masse des convertisseurs. Néanmoins, l'association d'un SSE avec un convertisseur permet une profondeur de décharge plus importante, donc évite le surdimensionnement des éléments de stockage.

3 COMPLEMENT AU DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE

Le dimensionnement réalisé dans la deuxième partie de ce chapitre est un dimensionnement axé sur les caractéristiques énergétiques des éléments de stockage. En effet, un des rôles essentiels des SSE dans un aéronef est de fournir la puissance et l'énergie nécessaires à son démarrage. Cet aspect est particulièrement dimensionnant pour des éléments de stockage. Cependant, il est indispensable de vérifier que le dimensionnement effectué sur le début de la mission est aussi valable pour la suite. Dans cette troisième partie, les performances énergétiques des SSE sont donc comparées avec les besoins énergétiques sur le reste de la mission pour vérifier leur compatibilité. Pour cela, on propose une étude graphique à partir de diagrammes Energie/Puissance. Dans un premier temps, les diagrammes des éléments de stockage, tels que dimensionnés au paragraphe V.2, sont décrits. Dans un deuxième temps, les diagrammes correspondant aux sollicitations des SSE sur la dernière partie du profil de mission sont présentés. Enfin, la juxtaposition des diagrammes permet de tirer des enseignements sur les niveaux d'état de charge de référence à fixer pour les éléments de stockage afin qu'ils puissent fournir et récupérer l'énergie sur la poutre, selon les besoins.

3.1 DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE DES ELEMENTS DE STOCKAGE

Les deux paragraphes suivants sont consacrés à l'élaboration des diagrammes Energie/Puissance d'un supercondensateur et d'un accumulateur électrochimique. Ces diagrammes sont assimilables à des diagrammes de Ragone, à la différence près que ce dernier représente les densités d'énergie et de puissance.

3.1.1 DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE D'UN SUPERCONDENSATEUR

L'élaboration du diagramme Energie/Puissance d'un supercondensateur nécessite d'exprimer son énergie en fonction de sa puissance.

L'énergie stockée dans un supercondensateur est :

$$W_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U_c^2 \quad \text{V-64}$$

La relation décrite en v-5 peut également s'écrire :

$$U_c = U_{sc} + R_{sc} \cdot I_{sc} \quad \text{V-65}$$

A partir des relations v-4, v-64 et v-65, l'énergie peut s'écrire en fonction de la puissance de deux manières :

- Soit à courant fixe :

$$W_{sc}(I_{sc}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{sc}}{I_{sc}^2} \cdot P_{sc}^2 + R_{sc} \cdot C_{sc} \cdot P_{sc} + \frac{1}{2} \cdot R_{sc}^2 \cdot C_{sc} \cdot I_{sc}^2 \quad \text{V-66}$$

- Soit à tension fixe :

$$W_{sc}(U_{sc}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{sc} \cdot R_{sc}^2}{U_{sc}^2} \cdot P_{sc}^2 + R_{sc} \cdot C_{sc} \cdot P_{sc} + \frac{1}{2} \cdot C_{sc} \cdot U_{sc}^2 \quad \text{V-67}$$

L'énergie maximale stockée dans un supercondensateur, donnée par la relation v-2, permet de fermer le diagramme Energie/Puissance pour la partie « restitution » (puissance positive). Le point 2 sur la Figure V-20 correspond à l'intersection des courbes définies par les équations v-66 et v-2 :

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{C_{sc}}{I_{sc}^2} \cdot P_{sc}^2 + R_{sc} \cdot C_{sc} \cdot P_{sc} + \frac{1}{2} \cdot R_{sc}^2 \cdot C_{sc} \cdot I_{sc}^2 = \frac{1}{2} \cdot C_{sc} \cdot U_{sc_max}^2 \quad \text{V-68}$$

Dont la solution est :

$$P_2 = I_{sc} \cdot U_{sc_max} - R_{sc} \cdot I_{sc}^2 \quad \text{V-69}$$

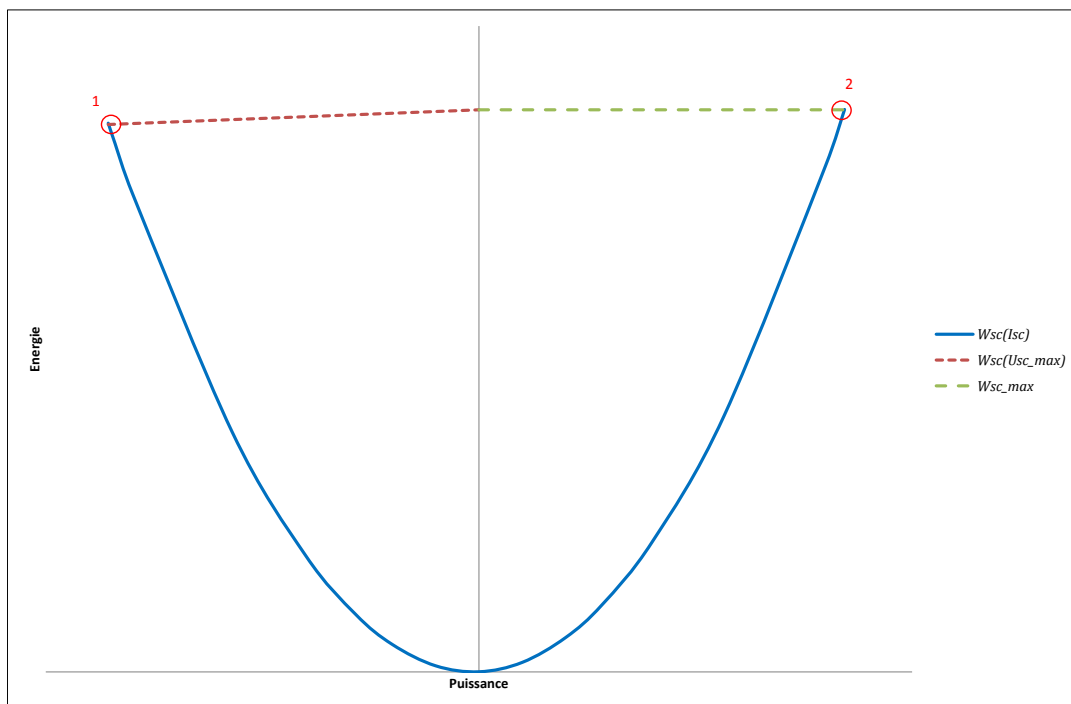


FIGURE V-20 : DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE – SUPERCONDENSATEUR

La relation v-67 à la tension U_{sc_max} permet de fermer le diagramme pour la partie « stockage » (puissance négative). Le point 1 sur la Figure V-20 correspond à l'intersection des courbes définies par les équations v-66 et v-67 à U_{sc_max} :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{sc}}{I_{sc}^2} \cdot P_{sc}^2 + R_{sc} \cdot C_{sc} \cdot P_{sc} + \frac{1}{2} \cdot R_{sc}^2 \cdot C_{sc} \cdot I_{sc}^2 \\ = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{sc} \cdot R_{sc}^2}{U_{sc_max}^2} \cdot P_{sc}^2 + R_{sc} \cdot C_{sc} \cdot P_{sc} + \frac{1}{2} \cdot C_{sc} \cdot U_{sc_max}^2 \end{aligned} \quad \text{V-70}$$

Dont la solution est :

$$P_1 = -I_{sc} \cdot U_{sc_max} \quad \text{V-71}$$

Deux autres points sont également remarquables sur le diagramme Energie/Puissance :

- A puissance nulle :

$$W_{sc(P_{sc}=0)} = \frac{1}{2} \cdot R_{sc}^2 \cdot C_{sc} \cdot I_{sc}^2 \quad \text{V-72}$$

- A énergie nulle :

$$P_{sc(W_{sc}=0)} = -R_{sc} \cdot I_{sc}^2 \quad \text{V-73}$$

Cela signifie que pour recharger un supercondensateur, il faut fournir une puissance supérieure aux pertes Joule.

3.1.2 DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE D'UN ACCUMULATEUR ELECTROCHIMIQUE

L'élaboration du diagramme Energie/Puissance d'un accumulateur électrochimique nécessite d'exprimer son énergie en fonction de sa puissance.

L'énergie stockée dans un accumulateur est :

$$W_{acc} = C_n \cdot E_0 \quad \text{V-74}$$

A partir des relations v-38 et v-74, l'énergie peut s'écrire en fonction de la puissance de deux manières :

- En charge :

$$W_{acc}(I_{acc_ch}) = P_{acc} \cdot t_{acc_ch} + R_{acc} \cdot I_{acc_ch}^2 \cdot t_{acc_ch} \quad \text{V-75}$$

- En décharge :

$$W_{acc}(I_{acc_dech}) = P_{acc} \cdot t_{acc_dech} + R_{acc} \cdot I_{acc_dech}^2 \cdot t_{acc_dech} \quad \text{V-76}$$

L'énergie maximale stockée dans un accumulateur W_{acc_max} permet de fermer le diagramme Energie/Puissance.

On note deux points remarquables sur la Figure V-21 lorsque la puissance est nulle :

- En charge (point 4) :

$$W_{acc}(P_{acc}=0) = R_{acc} \cdot I_{acc_ch}^2 \cdot t_{acc_ch} \quad \text{V-77}$$

- En décharge (point 3) :

$$W_{acc}(P_{acc}=0) = R_{acc} \cdot I_{acc_dech}^2 \cdot t_{acc_dech} \quad \text{V-78}$$

Lorsque les régimes de charge et décharge sont identiques (par exemple à C_n), les points 3 et 4 sont confondus.

On peut noter également que la puissance est égale aux pertes Joule lorsque l'énergie est nulle :

$$P_{acc}(W_{acc}=0) = R_{acc} \cdot I_{acc}^2 \quad \text{V-79}$$

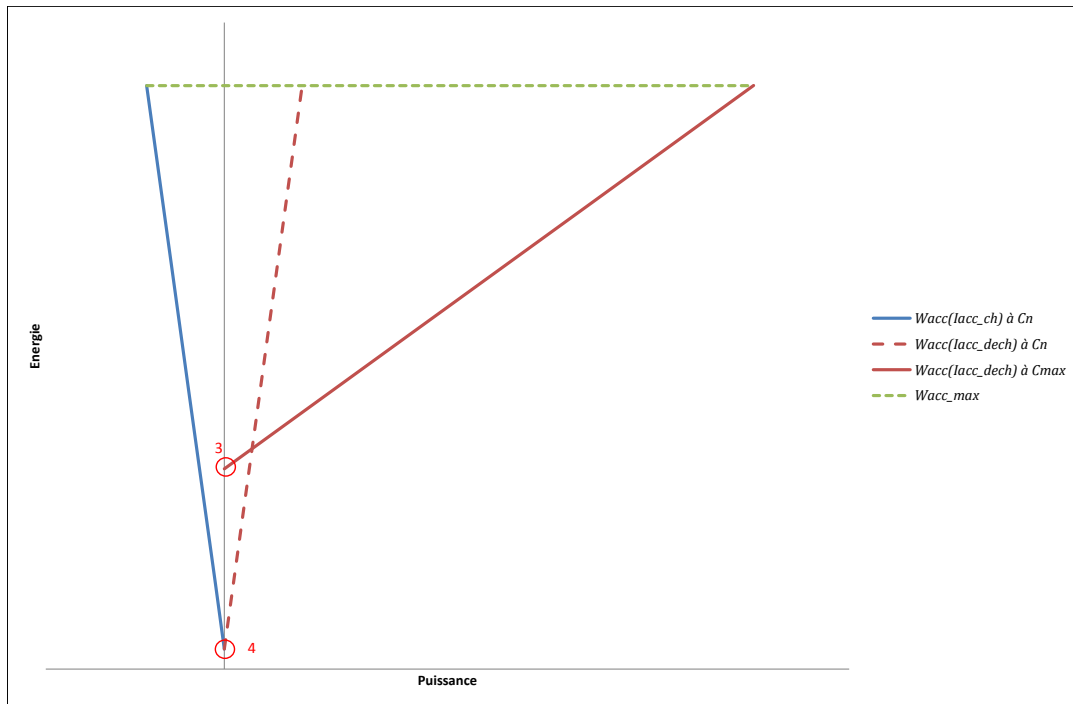


FIGURE V-21 : DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE – ACCUMULATEUR

3.2 DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE DES SSE DE LA POUTRE ELECTRIQUE

En appliquant les relations précédentes aux éléments de stockage dimensionnés dans le paragraphe V.2, on obtient les diagrammes Energie/Puissance donnés en Figure V-22 pour le pack de supercondensateurs (SCAP1) et en Figure V-23 pour la batterie d'accumulateurs (ACC1).

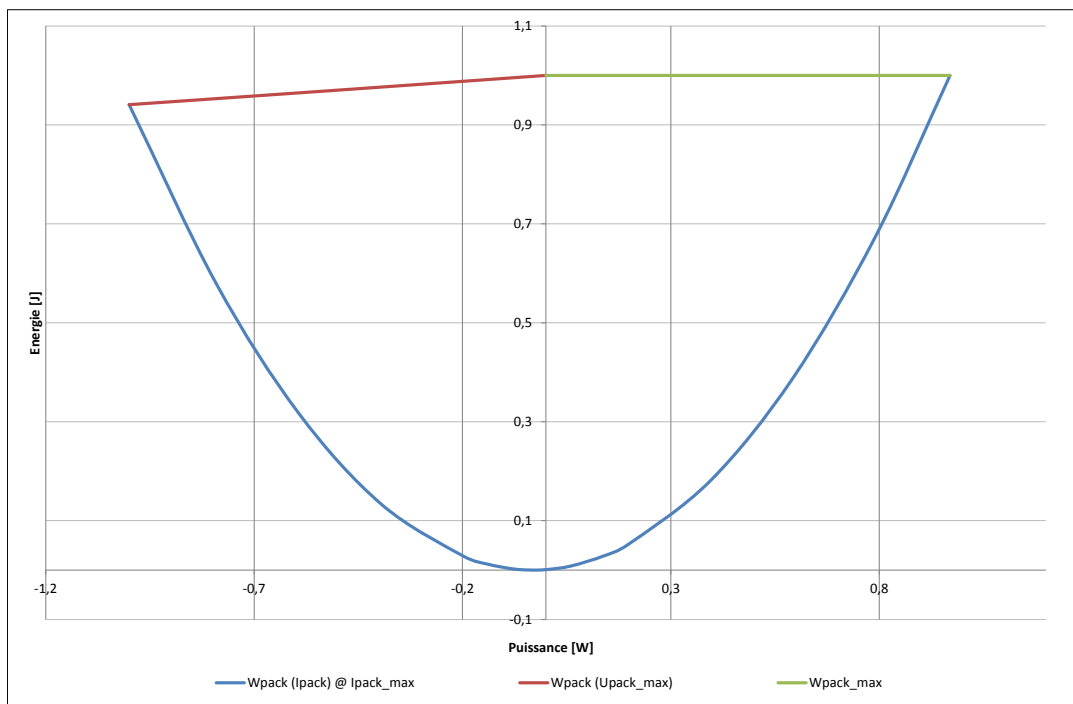


FIGURE V-22 : DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE – PACK DE SUPERCONDENSATEURS SCAP1

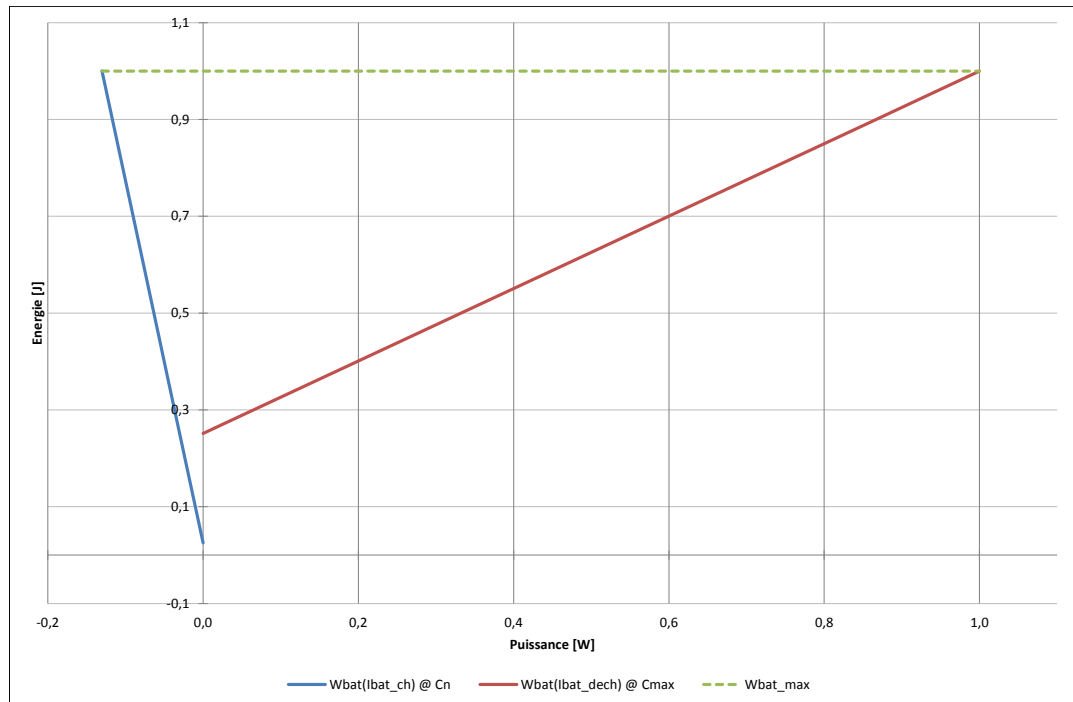


FIGURE V-23 : DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE – BATTERIE D'ACCUMULATEURS ACC1

3.3 COMPLEMENT AU DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE

Le dimensionnement des éléments de stockage, comme il est présenté dans la partie V.2, est réalisé en considérant la période du profil de mission où les SSE sont les seules sources disponibles dans la poutre, cette période étant dimensionnant en termes d'énergie, notamment pour les accumulateurs. Pour compléter cette étude, il est nécessaire de vérifier que le dimensionnement des éléments de stockage convient également pour le reste de la mission.

On s'intéresse donc à la période de la mission où toutes les sources sont disponibles, y compris les S/G, en configuration normale. Celle-ci correspond globalement à la phase en vol de l'aéronef. Au cours de cette période, la gestion d'énergie répartit l'appel de puissance des charges entre les différentes sources en fonction de leur caractéristique dynamique. Un autre aspect de la gestion d'énergie, illustré au paragraphe IV.2.2.1.2, est la « régulation » de l'état de charge des SSE du bus n°1 autour d'une référence. Ainsi, l'élément de stockage SCAP1 est rechargé par la batterie ACC1, elle-même rechargée par les S/G. Par conséquent, la puissance moyenne fournie par les éléments de stockage, pendant le fonctionnement en vol, est nulle. En Figure V-24, les courants des sources SCAP1 et ACC1 sont donnés sur une durée de 2000s, ils sont issus de la simulation du fonctionnement de la poutre au cours de la mission. Il apparaît clairement sur l'allure du courant de SCAP1 qu'une phase de décharge (courant positif) est suivie d'une phase de recharge (courant négatif), ce qui permet le maintien de l'état de charge autour de sa référence. Il en est de même pour la batterie, bien que cela soit moins évident à l'observation de l'allure du courant de la source ACC1. En fait, les pics de décharge sont relativement faibles en énergie, et le courant de charge est faible mais constant entre deux pics de décharge pour tenir compte de la limitation en recharge de la batterie. En moyenne, les courants de charge et de décharge s'équilibrent et l'état de charge de la batterie est maintenu constant.

Pour s'assurer que les éléments de stockage dimensionnés supportent ces fluctuations de courant (*i.e.* de puissance), on propose d'établir le diagramme Energie/Puissance correspondant à cette sollicitation sur le reste du profil de mission, afin de le comparer ensuite aux diagrammes Energie/Puissance issus du dimensionnement des SSE (Cf. Figure V-22 et Figure V-23).

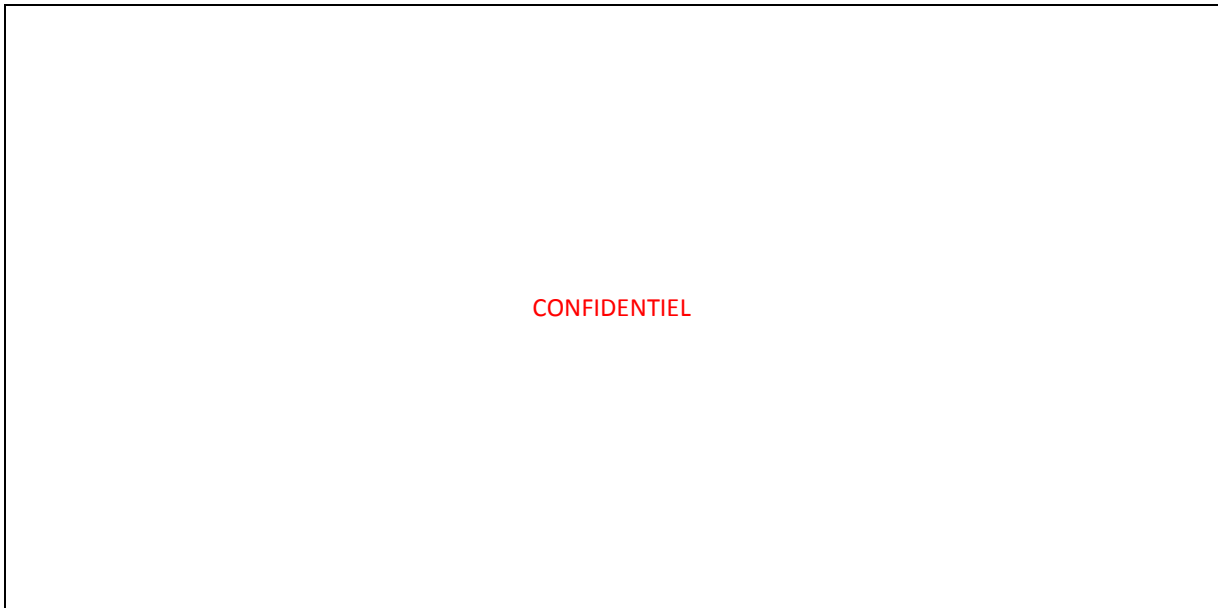


FIGURE V-24 : ALLURE DES COURANTS DEMANDES AUX SSE AU COURS DE LA MISSION

Par exemple le tracé de l'énergie du pack de supercondensateurs SCAP1 en fonction de sa puissance est donné en Figure V-25. La surface formée par ce tracé est ensuite considérée et est insérée dans le diagramme Energie/Puissance propre au dimensionnement du pack de supercondensateurs (Cf. Figure V-26). On observe que cette surface est répartie de part et d'autre des deux axes : l'axe des abscisses correspondant à une énergie nulle et l'axe des ordonnées correspondant à une puissance nulle. Cela signifie bien que les supercondensateurs se déchargent (puissance positive) et se rechargent (puissance négative), et qu'ils restituent de l'énergie (énergie positive) et en récupèrent (énergie négative).

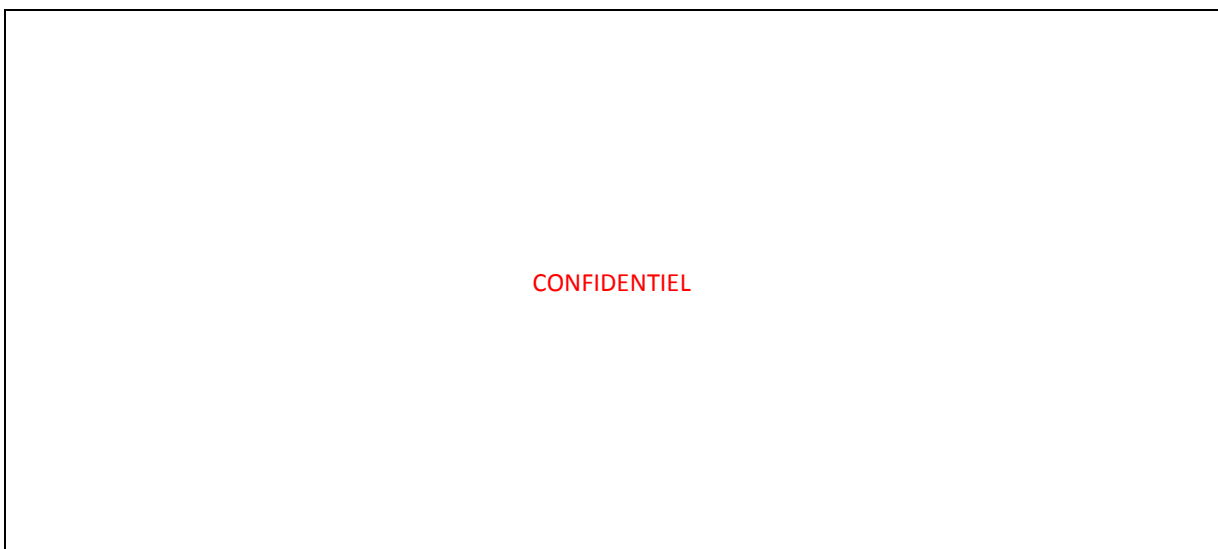


FIGURE V-25 : DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE DE LA SOURCE SCAP1 AU COURS DE LA MISSION

L'intégration de la surface correspondant aux fluctuations de puissance et d'énergie au cours de la mission sur le diagramme Energie/Puissance issu du dimensionnement montre que les supercondensateurs peuvent supporter ces fluctuations. En effet, la surface définie en Figure V-25 s'inscrit aisément dans la zone délimitant les caractéristiques d'énergie et de puissance de la source SCAP1.

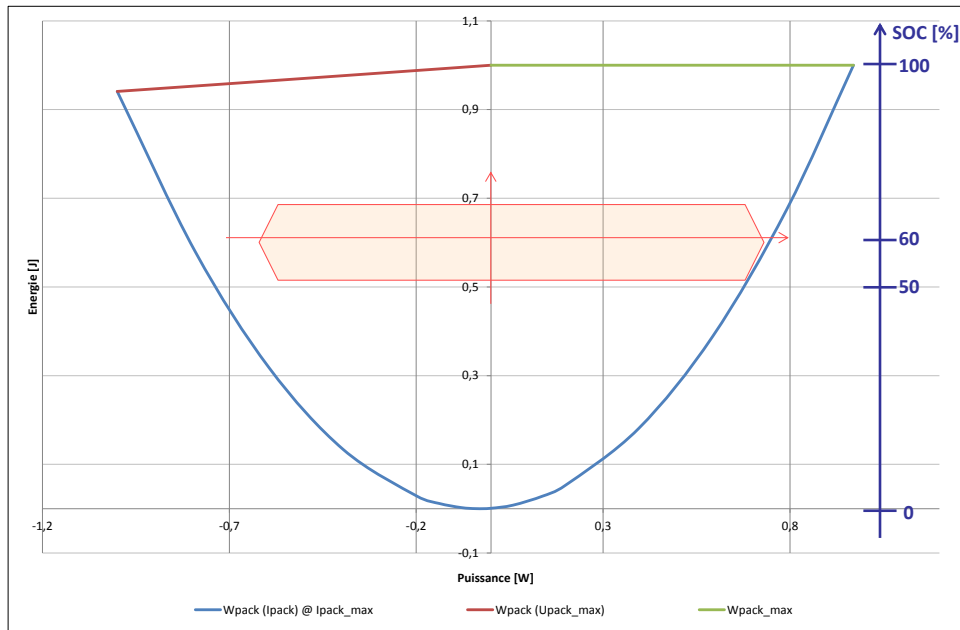


FIGURE V-26 : DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE – COMPLEMENT AU DIMENSIONNEMENT DE SCAP1

De plus, cette représentation graphique permet de déterminer l'intervalle dans lequel peut être comprise la référence pour la « régulation » de l'état de charge. D'une part, on détermine sa valeur minimale, en dessous de laquelle il n'est pas souhaitable de descendre. Si l'état de charge est « régulé » autour d'une valeur inférieure à 60%, le pack de supercondensateurs n'est pas en mesure de fournir la puissance demandée au cours de la mission. De même, si l'état de charge est « régulé » autour d'une valeur supérieure à 90%, les supercondensateurs ne sont plus en mesure de stocker l'énergie en excès sur la poutre. L'état de charge référence est donc compris entre 60 et 90%.

La même démarche est effectuée pour la batterie ACC1. La surface obtenue à partir des fluctuations en énergie et en puissance n'est pas répartie de manière égale autour des axes des abscisses et des ordonnées car le comportement de la batterie n'est pas symétrique en charge et en décharge (Cf. Figure V-27).

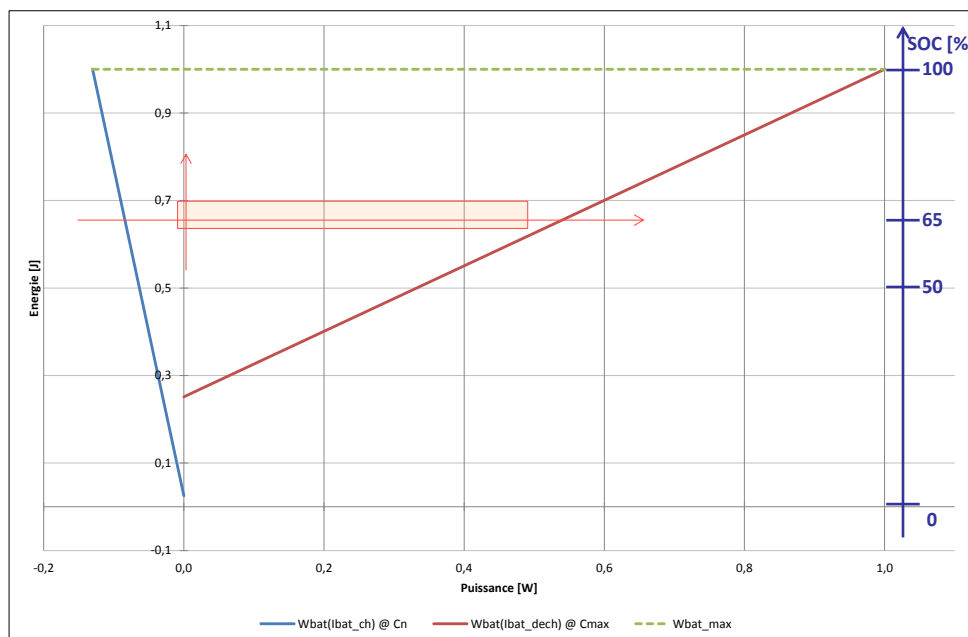


FIGURE V-27 : DIAGRAMME ENERGIE/PUISSANCE – COMPLEMENT AU DIMENSIONNEMENT DE ACC1

Comme pour le pack de supercondensateurs, cette représentation graphique permet de déterminer les valeurs minimale et maximale pour la référence de l'état de charge. L'intervalle est le suivant : [65 ; 90]% pour l'état de charge référence de la batterie ACC1.

Le dimensionnement des éléments de stockage a été réalisé dans le but de fournir l'énergie nécessaire au début de la mission. Il permet également d'assurer le reste de la mission en fournissant la puissance demandée par les charges et en stockant l'énergie en excès, le cas échéant.

Après s'être assuré que le dimensionnement est valable sur l'intégralité du profil de mission, l'étape suivante consiste à valider ce dimensionnement « énergétique » par une simulation du fonctionnement des SSE dans le domaine temporel, à l'aide des modèles établis dans les chapitres II et III.

4 VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT

L'objet de cette partie est de valider le dimensionnement des éléments de stockage ACC1, SCAP1 et SCAP2, réalisé précédemment, par simulation du comportement des éléments de stockage en réponse à une sollicitation. La validation proposée tient compte de l'association des sources : les éléments de stockage du bus n°1 sont associés à des convertisseurs et la répartition des courants est maîtrisée ; les éléments de stockage du bus n°2 sont directement connectés au bus et la répartition des courants se fait par la différence de leur impédance.

4.1 VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DES SSE DU BUS N°1

Dans ce paragraphe, une validation du dimensionnement des SSE du bus n°1 est proposée par simulation de leur comportement en réponse au profil de charge utilisé comme donnée d'entrée pour l'outil de dimensionnement. Ce profil de charge, établi au paragraphe V.2.1.1 pour le dimensionnement des SSE du bus n°1, est réparti entre les deux éléments de stockage, suivant un critère dynamique. La fréquence de coupure du filtre passe-bas employé ici est celle qui a été déterminée pour minimiser la masse du système de stockage, à savoir 5mHz. Les modèles de cellules d'accumulateurs et de supercondensateurs sont implantés, leurs courants et tensions respectifs sont obtenus en considérant les nombres de cellules en série et en parallèle, comme cela est indiqué sur la Figure V-28.

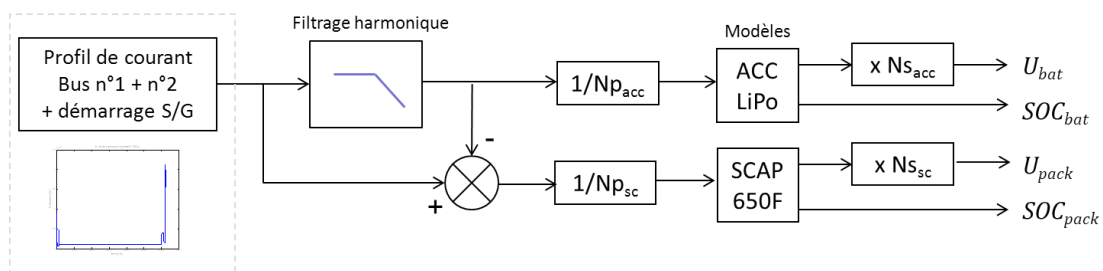


FIGURE V-28 : SYNOPTIQUE DE LA DEMARCHE POUR LA VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DES SSE DU BUS N°1

La simulation du comportement des SSE du bus n°1 en réponse à la sollicitation de puissance (en début de mission) à 20°C donne les résultats suivants (Cf. Figure V-29) : le pack de supercondensateurs est sollicité pour fournir un courant à dynamique élevée et la batterie fournit l'énergie. En fin de profil, sa tension se rapproche de sa valeur minimale correspondant à un faible état de charge. La batterie ACC1 est donc pleinement exploitée durant cette partie de mission.

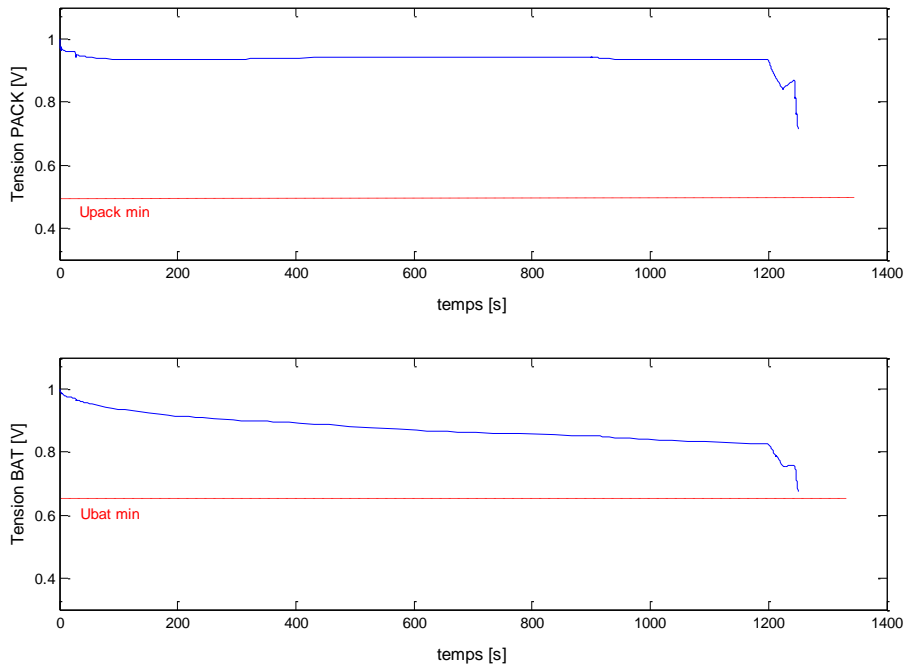


FIGURE V-29 : VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DES SSE DU BUS N°1 – RESULTATS DE SIMULATION A 20°C (FC = 5MHZ)

Une autre simulation est réalisée à la température de 0°C pour analyser le comportement des SSE (Cf. Figure V-30). A cette température, la tension aux bornes de ACC1 chute en-dessous de la tension minimale en fin de profil, du fait de l’augmentation de l’impédance de la batterie à basses températures.

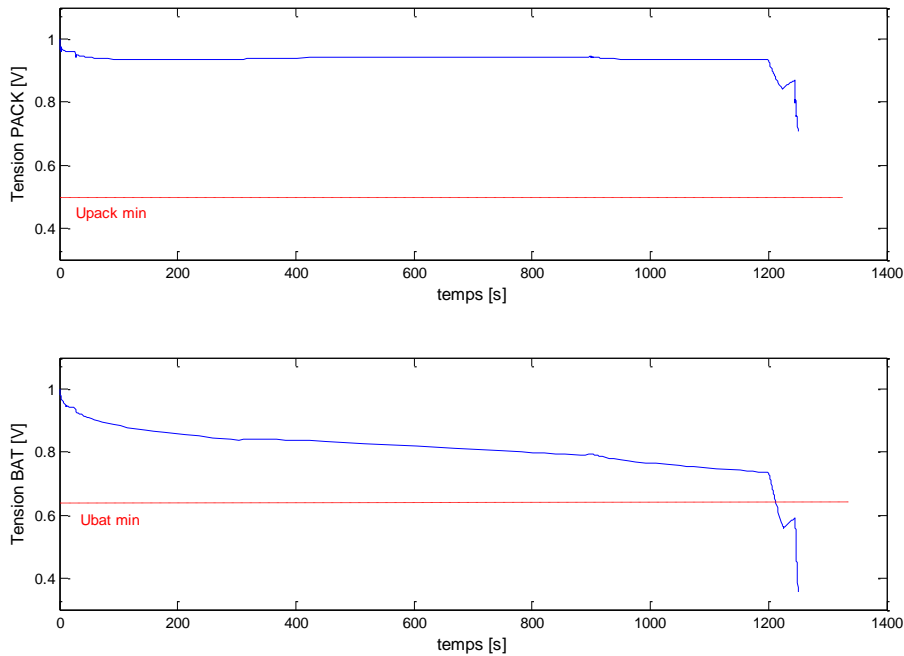


FIGURE V-30 : VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DES SSE DU BUS N°1 – RESULTATS DE SIMULATION A 0°C (FC = 5MHZ)

Dans ce cas, pour éviter de dégrader la batterie, on envisage de solliciter davantage les supercondensateurs en faisant évoluer la fréquence de coupure répartissant la puissance entre les deux sources. Les résultats de simulation à 0°C avec une fréquence de coupure de 1,5mHz (Cf. Figure V-31) montrent que la tension de la batterie en fin de profil est acceptable et la profondeur de décharge de SCAP1 atteint 75%.

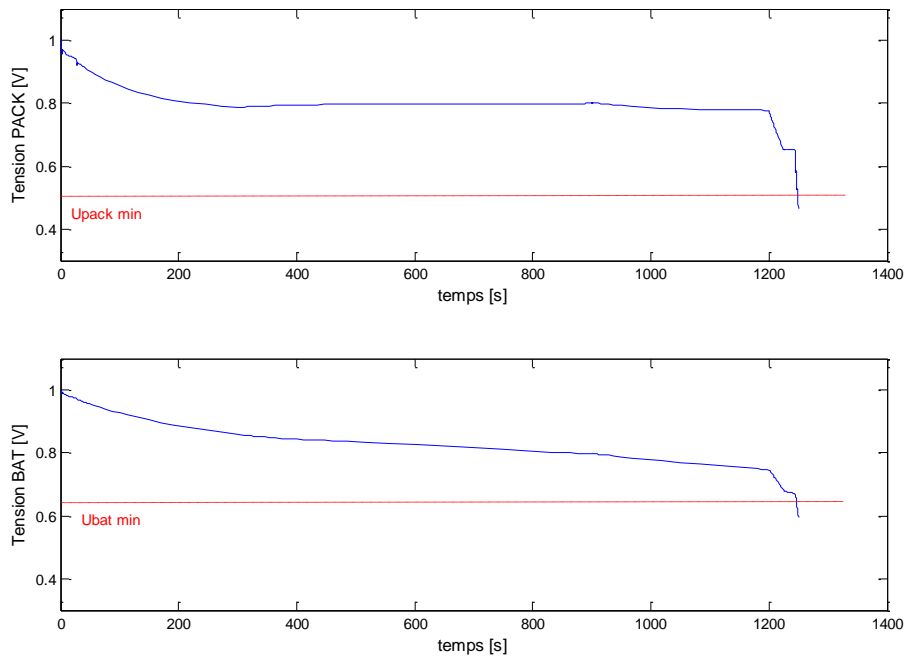


FIGURE V-31 : VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DES SSE DU BUS N°1 – RESULTATS DE SIMULATION A 0°C (FC = 1,5MHZ)

Pour conclure, le dimensionnement des SSE du bus n°1 a été réalisé à partir d’un algorithme qui intègre le profil de mission (il en extrait les besoins énergétiques demandés aux éléments de stockage) et utilise un catalogue de composants fourni par les constructeurs. Ce dernier renseigne le modèle quasi-statique pour les accumulateurs et le modèle standard pour les supercondensateurs, les paramètres de ces modèles étant donnés à la température de 20°C. La validation, présentée ici, consiste à appliquer le profil de charge aux SSE en utilisant les modèles développés dans les chapitres précédents, à la place des données constructeurs, et à observer l’évolution en fonction du temps des grandeurs caractéristiques. Dans un premier temps, la simulation est effectuée à 20°C et les résultats montrent que les éléments de stockage sont bien dimensionnés. Ensuite, la simulation est effectuée à 0°C. Les modèles, établis auparavant, permettent une évaluation du dimensionnement à d’autres températures que 20°C. A basse température, le fonctionnement de la batterie d’accumulateur est fortement impacté et le dimensionnement mis à mal. Cependant, pour éviter une remise en cause du dimensionnement, la solution proposée est d’agir sur la fréquence de coupure du filtre passe-bas afin de solliciter davantage les supercondensateurs, moins sensibles à la température que les accumulateurs.

4.2 VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DES SSE DU BUS N°2

Dans ce paragraphe, une validation du dimensionnement des SSE du bus n°2 est proposée par simulation de leur comportement en réponse à une variation de la tension du bus. Les modèles de la batterie Ni-Cd et de supercondensateurs sont implantés (Cf. Figure V-32), leurs courants et tensions respectifs sont obtenus en considérant les nombres de cellules en série et en parallèle.

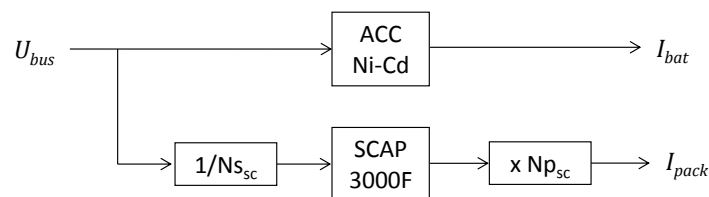


FIGURE V-32 : SYNOPTIQUE DE LA DEMARCHE POUR LA VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DES SSE DU BUS N°2

Les SSE du bus n°2 sont reliés directement au bus. La tension à leurs bornes est donc égale à la tension du bus. Pour solliciter ces SSE, une chute de tension est provoquée sur le bus (échelon évoluant de la tension nominale à la tension minimale) et l'évolution du courant fourni par les SSE en réponse à cette chute de tension est observée. En Figure V-33, sont donnés les résultats de la simulation. On observe que la réponse des SSE à cette variation de tension est rapide, pour les supercondensateurs et pour les accumulateurs. En effet, le modèle de la batterie est un modèle quasi-statique, la chute de tension de la résistance est immédiate. Néanmoins, cette simulation met en évidence la différence de comportement entre le pack de supercondensateurs, pour lequel le courant de décharge évolue rapidement et à forte amplitude, et la batterie Ni-Cd pour laquelle l'évolution du courant est plus lente. Le pic de courant observé pour la batterie est inférieur au courant maximal admissible. Le pic de courant observé pour les supercondensateurs lors de la chute de tension du bus est supérieur au courant impulsionnel qu'ils peuvent fournir, ceci est dû à l'amplitude et la rapidité de la chute de tension.

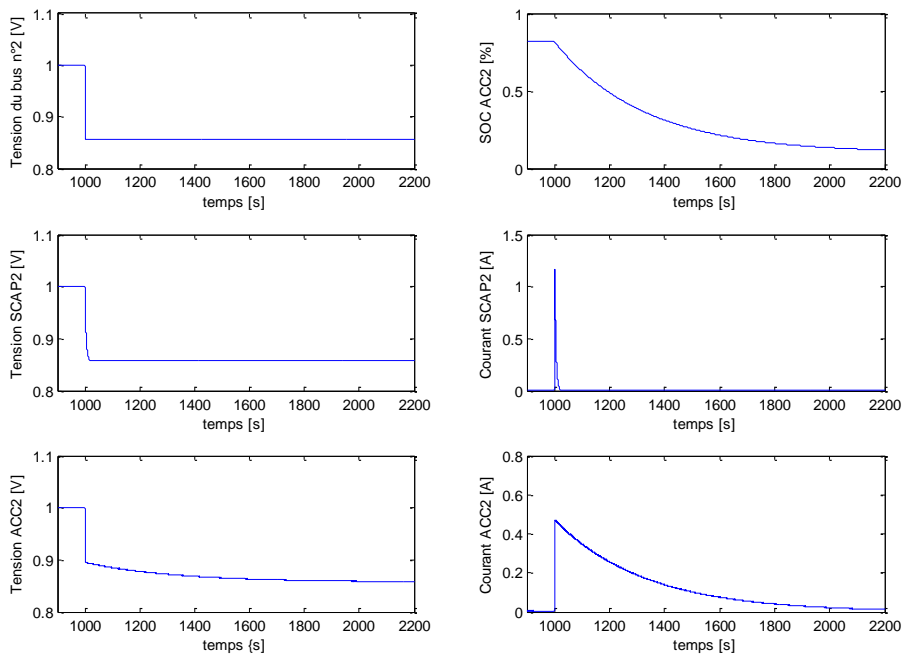


FIGURE V-33 : VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DES SSE DU BUS N°2 – RESULTATS DE SIMUATION A 20°C

En conclusion de ce paragraphe, le dimensionnement effectué au paragraphe V.2.2, a été réalisé sur l'hypothèse d'une répartition fréquentielle de l'appel de courant entre les deux sources. La validation, présentée ci-dessus, est réalisée en considérant l'architecture retenue, à savoir les SSE connectés directement au bus. Les résultats montrent que la répartition entre les deux sources est obtenue indirectement par la différence de leur impédance et leur apport énergétique est fonction de leur comportement en réponse à une variation de tension à leurs bornes.

5 CONCLUSION SUR LE DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE STOCKAGE

Dans ce dernier chapitre, le dimensionnement des éléments de stockage de la poutre électrique a été réalisé en considérant les différents types d'association et les fonctions attribuées aux éléments de stockage. Le dimensionnement est conditionné à la manière d'associer les SSE entre eux et de les connecter au bus. Dans la poutre électrique étudiée, deux associations ont été considérées : une hybridation directe des sources sur le bus n°2 et une association par l'intermédiaire de convertisseurs pour les SSE du bus n°1. Cette dernière permet de faire évoluer le dimensionnement par action sur ses paramètres de réglage.

Dans le cadre du Projet, les éléments de stockage ont deux fonctions : assurer le démarrage de l'aéronef et fournir une puissance à dynamique élevée, en complément de la génération électrique par les S/G, tout au long de la mission. Le dimensionnement a été effectué par rapport à l'aspect le plus contraignant, en l'occurrence la fourniture énergétique en début de mission où les éléments de stockage sont les seules sources disponibles. L'objectif est alors de répartir au mieux les besoins énergétiques de la poutre entre les différentes sources en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques, tout en cherchant à limiter la masse embarquée. Pour cela, on fait intervenir une gestion fréquentielle des sources. L'influence de la fréquence de filtrage sur le résultat du dimensionnement a été étudiée.

Ensuite, la deuxième fonction des éléments de stockage a été prise en compte. Le dimensionnement, réalisé en amont, permet d'assurer cette deuxième fonction. Ce complément de dimensionnement conduit à considérer la fourniture d'une puissance ou d'une énergie et également la récupération de puissance ou d'énergie. Ainsi, les niveaux d'état de charge de référence nécessaires pour une gestion d'énergie efficace ont été déterminés.

Enfin, une validation du dimensionnement a été proposée par simulation du comportement des SSE dans le domaine temporel, en réponse à une sollicitation représentative d'une mission. Cette dernière partie a mis en évidence l'avantage de l'association de sources présentant des propriétés complémentaires, en termes de performances énergétiques et de comportement à la température. L'association de SSE via des convertisseurs et l'implantation d'une gestion fréquentielle des sources offre la possibilité de répartir les besoins énergétiques entre les sources de manière évolutive en fonction de la température. A basses températures où la batterie d'accumulateurs est moins performante, les supercondensateurs peuvent être davantage sollicités.

VI. CONCLUSION

La gestion d'un réseau électrique embarqué nécessite l'introduction de systèmes de stockage de l'énergie pour assurer la stabilité et la qualité du réseau et garantir la disponibilité de l'énergie. Depuis quelques années, on s'oriente vers des aéronefs « plus électriques », ce qui implique une consommation électrique plus élevée et un changement de périmètre fonctionnel pour les systèmes de stockage. L'optimisation du rendement énergétique global, la réduction des masses embarquées et la nécessité de répondre aux besoins énergétiques croissants conduisent à développer de nouvelles technologies et méthodes pour générer l'énergie électrique à bord, pour la distribuer, la convertir et la stocker. C'est dans ce contexte que s'est déroulée cette thèse, relative à la caractérisation et à la modélisation de composants de stockage de l'énergie électrique pour une application aéronautique.

Dans le premier chapitre, un état de l'art sur les SSE (Systèmes de Stockage de l'Energie) décentralisés et réversibles pour le stockage direct ou indirect de l'énergie électrique a été présenté. Il intègre une comparaison des moyens de stockage sur des critères quantitatifs, définis expressément. Cette comparaison a mis en évidence la nécessité de les hybrider ou de les associer afin de répondre aux besoins énergétiques de l'Application, de favoriser leur fonctionnement et *in fine* d'améliorer leur durée de vie. En effet, leur complémentarité en termes de caractéristiques énergétiques (puissance et énergie) est indispensable car aucun SSE n'est capable de fournir une forte puissance avec une autonomie très grande.

Compte-tenu des performances attendues et des contraintes liées à l'Application, les supercondensateurs et les accumulateurs électrochimiques Lithium-ion polymère ont été retenus pour cette étude. Ces composants sont de technologies nouvelles pour l'Application, et cela d'autant plus dans le cadre d'une utilisation tout au long d'une mission. Pour appréhender leur comportement dans le système complet et dans ces conditions d'utilisation, il est nécessaire de les caractériser et de les modéliser.

Les chapitres II et III sont donc dédiés à la caractérisation et à la modélisation des accumulateurs électrochimiques et des supercondensateurs. La modélisation dépend de l'utilisation qui est faite du modèle, lors de la simulation numérique du fonctionnement du système. En effet, pour évaluer la stratégie de gestion de l'énergie par simulation, il est nécessaire de disposer d'un modèle moyen de la poutre électrique. Par contre, l'analyse de la qualité du réseau par simulation nécessite des modèles de composants dont la granularité est plus fine que celle des modèles utilisés pour élaborer une gestion de l'énergie. Plusieurs modèles ont donc été élaborés dans cette étude. Tous sont des modèles par circuits électriques équivalents. Pour modéliser les composants de stockage, on a procédé à des essais de caractérisation. L'établissement de plusieurs modèles a nécessité la réalisation de différentes caractérisations pour identifier les paramètres de ces modèles et ce dans des conditions expérimentales en cohérence avec l'Application. Les essais ont été réalisés sur un banc de test spécialement réalisé pour la caractérisation des composants de stockage. Les méthodes d'essais mises en œuvre sont la chronopotentiométrie à courant constant et la spectrométrie d'impédance électrochimique. Les procédures d'essais et les méthodes d'identification des paramètres des modèles ont été exposées.

Le chapitre II était consacré à la caractérisation et à la modélisation d'accumulateurs électrochimiques de technologie Lithium-ion polymère. Après avoir déterminé la capacité des accumulateurs testés, ils ont été caractérisés en vue d'identifier les paramètres des deux modèles retenus, à savoir un modèle quasi-statique et un modèle dynamique. Le modèle quasi-statique a été développé sur la base du modèle de Thévenin et a été amélioré dans le sens où ses paramètres sont exprimés en fonction de contraintes physiques telles que l'état de charge et la température. Le modèle dynamique a été élaboré à partir du modèle de Randles, composé d'une tension à vide (fonction de l'état de charge comme établie dans le modèle quasi-statique) et d'une impédance complexe, représentant les phénomènes de transfert de charge, de double couche électrique et de

diffusion. Cette étude a abouti à un modèle valide dans le domaine fréquentiel et sa transposition dans le domaine temporel a donné lieu à un modèle approché, dont la précision est toutefois satisfaisante. Les comparaisons avec les résultats expérimentaux sont conformes aux attentes pour les deux modèles. Au cours de cette étude, on a souligné la complémentarité des essais, à courant fort et à petits signaux, et la cohérence des résultats. En effet, leur comparaison a permis d'affiner les paramètres des deux modèles. Enfin, les caractérisations des accumulateurs électrochimiques Lithium-ion polymère ont conduit à observer l'influence de la température sur leur comportement électrique : les performances des accumulateurs sont considérablement diminuées à basses températures.

La caractérisation et la modélisation des supercondensateurs ont été développées dans le chapitre III. Dans un premier temps, le modèle standard a été étudié. L'établissement de ce modèle simple et normalisé avait pour but de comparer les résultats avec les données des constructeurs, qui se réfèrent à cette norme pour rédiger leurs fiches techniques. Un second modèle fonctionnel a également été développé pour intégrer l'influence de la tension sur la valeur de la capacité des supercondensateurs. Les deux modèles fonctionnels (modèle standard et modèle à deux branches R-C) ayant l'inconvénient de représenter assez mal le comportement des supercondensateurs dans les phases transitoires, un modèle dynamique a été proposé. Celui-ci intègre une impédance complexe pour représenter au mieux le comportement fréquentiel du composant. Au vu des comparaisons entre ces trois modèles et les relevés expérimentaux, il apparaît que les résultats sont assez cohérents bien qu'ils aient été obtenus par des méthodes d'essais différentes (charge/décharge à courant fort ou spectrométrie par petits signaux). Il est donc important de considérer ces caractérisations comme étant complémentaires les unes des autres. En outre, ces caractérisations ont permis d'établir une importante base de données expérimentales ainsi qu'une bibliothèque de modèles associés, celles-ci pouvant être exploitées par la suite dans le cadre de simulation de la poutre complète. Aussi, ces caractérisations ont permis de tirer un certain nombre d'enseignements sur le comportement électrique et physique des supercondensateurs, notamment en fonction de la température. On a pu noter que la température a une influence sur la résistance interne des modèles fonctionnels et sur l'impédance du modèle dynamique, mais elle n'en a quasiment pas sur la capacité des composants. Ce point est important dans la perspective d'une association des supercondensateurs avec des accumulateurs dont la capacité de stockage est très diminuée à basses températures.

Les modèles établis dans les chapitres II et III ont ensuite été validés sur des profils de courant issus de l'Application. Dans un premier temps, l'élaboration des profils de courant a été présentée à partir des profils de mission type d'un aéronef, de l'architecture et de la stratégie de gestion de l'énergie (autrement dit la répartition des besoins énergétiques entre les sources en présence en fonction de critères spécifiques). Dans un second temps, les profils de courant tels que définis ont été appliqués aux composants lors d'essais en température et les résultats expérimentaux ont été comparés aux résultats de simulation des modèles développés précédemment. Les résultats des essais et des simulations des divers modèles suite à l'application des profils de courant ont montré que les modèles de supercondensateurs représentent bien leur comportement, et ce sur toute la plage de température. En effet, les paramètres des modèles sont assez peu sensibles à la température (particulièrement la capacité). En ce qui concerne les modèles d'accumulateurs, ils représentent assez bien le comportement du composant. Cependant, les écarts peuvent être importants entre le modèle quasi-statique et les mesures à basses températures. En effet, à ces températures, l'impédance de l'accumulateur est élevée et le modèle quasi-statique l'intègre mal, au travers de la résistance série. La mesure de l'impédance à basses températures nécessite donc une attention particulière pour établir un modèle valide à ces températures. En outre, les écarts entre modèles fonctionnels et comportementaux relevés dans les chapitres II et III ont été également observés lors des essais de validation des modèles. Enfin, compte-tenu des écarts observés entre les différents modèles et les relevés expérimentaux, on estime que les modèles, tels que développés, sont valides par rapport à l'utilisation qu'il en sera faite, sur l'intervalle de tension (ou d'état de charge) et sur la plage de température propres à chaque composant. Ces essais sur des profils de courant

représentatifs de l'Application ont donc permis de valider les modèles en complément des validations partielles qui avaient été faites dans les chapitres II et III.

Enfin, le dernier chapitre était consacré au dimensionnement des éléments de stockage de la poutre électrique. Les deux types d'association de sources, existant dans la poutre électrique, ont été étudiés : la connexion directe des éléments de stockage au bus (cas du bus n°2) et la connexion par l'intermédiaire de convertisseurs au bus (cas du bus n°1). Le dimensionnement proposé tient compte de ces différentes associations et de la stratégie de gestion de l'énergie, développée dans le cadre du Projet. Il a été réalisé en intégrant un profil de charge (issu du profil de mission), et plus particulièrement la période du profil de charge où les éléments de stockage sont les plus sollicités. Pour les SSE du bus n°1, la gestion fréquentielle des sources a été mise en œuvre et une étude a été menée sur l'influence de la fréquence de coupure, notamment, sur le dimensionnement. Ensuite, une vérification du dimensionnement obtenu a été proposée sur le reste du profil de mission. Cette étape a permis de déterminer les niveaux d'état de charge référence pour une gestion efficace de l'énergie. Enfin, une validation du dimensionnement a été effectuée en simulant le fonctionnement des éléments de stockage dimensionnés, en réponse à un profil de charge type. Les modèles des sources utilisés pour cette simulation sont ceux qui ont été établis dans les chapitres II et III. Ces modèles intègrent l'influence de la température sur leurs paramètres, ce qui permet de simuler le fonctionnement du système à différentes températures et de valider le dimensionnement dans ces conditions. Au cours de cette étude, on a vu l'intérêt d'associer des sources complémentaires en termes de performances et l'intérêt de gérer l'énergie entre les différentes sources. La gestion fréquentielle permet de répartir le profil de charge entre les sources et la fréquence de coupure peut être adaptée à basses températures notamment pour ne pas solliciter les sources sensibles à la température (comme les accumulateurs).

Ces travaux ont contribué à démontrer l'intérêt d'associer des éléments de stockage, complémentaires en termes de performances énergétiques et de comportement à la température, et l'avantage de gérer leur sollicitation électrique. En complément à ces travaux, plusieurs axes de recherche peuvent être proposés. Premièrement, les caractérisations et modélisations, rapportées dans ce mémoire, ont été effectuées sur des cellules de base, composant unitaire des modules. Une comparaison des modèles de cellules et de modules serait l'opportunité d'étudier l'influence des BMS (Battery Management Systems) et autres circuits d'équilibrage présents dans les modules pour assurer un bon fonctionnement et la protection des dispositifs de stockage. Deuxièmement, l'impact de la température est à prendre en considération pour la modélisation et le dimensionnement. En effet, les modèles proposés dans cette thèse intègrent la notion de température sous la forme de tables de données à partir desquelles les valeurs sont extrapolées. L'étude du comportement thermique des composants et sa modélisation selon des lois définies serait un apport important pour l'étude du système complet dans les conditions de l'application. De plus, le dimensionnement des éléments de stockage peut être amélioré en prenant en compte l'influence de la température. Troisièmement, l'étude du vieillissement des composants de stockage est un axe de travail potentiel. Ce type d'étude nécessite d'identifier les mécanismes de défaillance des composants et de tenter de reproduire le vieillissement par des essais accélérés, par exemple. L'influence de l'architecture électrique est également à étudier dans le cadre du vieillissement des composants. En effet, les éléments de stockage sont sollicités différemment, selon qu'ils sont directement connectés au bus ou qu'ils sont reliés par l'intermédiaire d'un convertisseur. Le changement de périmètre fonctionnel des éléments de stockage conduit à mener ces études. Enfin un quatrième axe pour poursuivre ces travaux peut être l'établissement de profil de mission de manière statistique. On a vu l'importance de disposer de profils de mission représentatifs pour valider les modèles ou pour réaliser le dimensionnement. Ils s'avèrent être indispensables pour l'étude du vieillissement des composants.

VII. ANNEXES

Annexe 1 : Complément sur les caractéristiques des accumulateurs

Annexe 2 : Fiche technique – Li-ion polymère 4,8Ah – Kokam

Annexe 3 : Synthèse des résultats sur les accumulateurs

Annexe 4 : Fiches techniques – Supercondensateurs Maxwell et Batscap

Annexe 5 : Synthèse des résultats sur les supercondensateurs

Annexe 6 : Représentation d'impédances complexes dans le plan de Nyquist

Annexe 7 : Représentation Energétique Macroscopique

1 ANNEXE 1 : COMPLEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES DES ACCUMULATEURS

Potentiel électrochimique et tension d'équilibre

Le potentiel thermodynamique d'un couple redox est lié aux activités des espèces chimiques électro-actives par la loi de Nernst :

$$E_{/ESH} = E_{/ESH}^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot \mathcal{F}} \cdot \ln \prod_i a_i^{\nu_i} \quad \text{VII-1}$$

Avec : $E_{/ESH}$: potentiel relatif du couple dans un état quelconque non standard [V]

$E_{/ESH}^0$: potentiel relatif standard (Electrode Standard à Hydrogène) [V]

R : constante des gaz parfaits¹³

T : température absolue [K]

\mathcal{F} : constante de Faraday¹⁴

n : nombre d'électrons échangés dans la demie équation redox

a_i : activité de l'espèce i qui intervient dans la demie réaction redox

ν_i : coefficient stœchiométrique de l'espèce i

Capacités

Loi de Faraday :

$$Q_f = \frac{n \cdot \mathcal{F}}{\nu_i} \cdot \Delta N_i \quad \text{VII-2}$$

Avec : Q_f : capacité ou quantité de charge faradique échangée durant le temps t [C]

\mathcal{F} : constante de Faraday

n : nombre d'électrons échangés dans la demie équation redox

ν_i : coefficient stœchiométrique de l'espèce i

ΔN_i : variation du nombre de moles de l'espèce i durant t [mol]

La capacité maximale théorique d'une électrode est atteinte lorsque la totalité du matériau électro-actif est transformée.

$$C_{\text{électrode}} = \left| \frac{n \cdot \mathcal{F}}{\nu_i} \right| \cdot N_{\text{initial}} \quad \text{VII-3}$$

Avec : $C_{\text{électrode}}$: capacité maximale d'une électrode (quand $N_{\text{final}} = 0$) [C]

N_{initial} : nombre initial de moles de l'espèce i [mol]

Le rendement faradique global est défini de la manière suivante :

$$\eta_F = \frac{C_R}{C_S} \quad \text{VII-4}$$

Avec : C_R : capacité restituée en décharge [Ah]

C_S : capacité fournie à l'accumulateur lors du protocole de charge [Ah]

¹³ Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

¹⁴ Constante de Faraday : $\mathcal{F} = 96485 \text{ C.mol}^{-1}$

La capacité restituée, ici, correspond à la quantité de charge restituée lors d'une décharge à régime nominal en respectant le critère final défini par le constructeur, le critère initial n'étant pas forcément un accumulateur complètement chargé.

Phénomène de diffusion

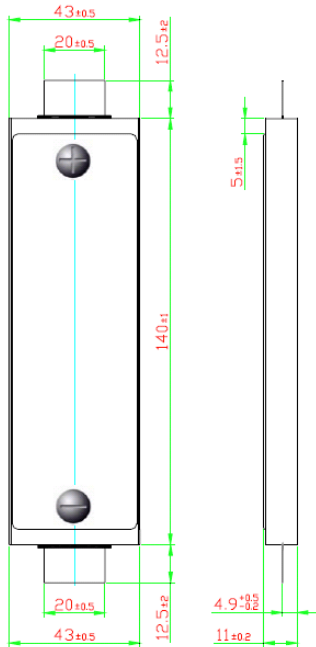
Dans l'hypothèse de Warburg, le phénomène de diffusion peut être représenté par une impédance qui s'exprime en fonction du paramètre suivant :

$$\sigma = \frac{R.T}{n^2.F^2.A.\sqrt{2}} \left(\frac{1}{C_O.\sqrt{D_O}} + \frac{1}{C_R.\sqrt{D_R}} \right) \quad \text{VII-5}$$

- Avec :
- σ : paramètre dépendant des phénomènes électrochimiques [$\Omega.s^{-1/2}$]
 - R : constante des gaz parfaits [$J.K^{-1}.mol^{-1}$]
 - T : température absolue [K]
 - F : constante de Faraday [$C.mol^{-1}$]
 - n : nombre d'électrons échangés dans la réaction
 - A : surface de l'électrode [cm^2]
 - C_O : concentration de l'oxydant à la surface de l'électrode [$mol.cm^{-3}$]
 - C_R : concentration du réducteur à la surface de l'électrode [$mol.cm^{-3}$]
 - D_O : coefficient de diffusion de l'oxydant [$cm^2.s^{-1}$]
 - D_R : coefficient de diffusion du réducteur [$cm^2.s^{-1}$]

2 ANNEXE 2 : FICHE TECHNIQUE – LI-ION POLYMERE 4,8AH – CELLULE KOKAM
SLPB11043140H

Cell Specification on SLPB11043140H



| | | |
|---|--------------------|-------------------------|
| ● Typical Capacity ¹⁾ | | 4.8 Ah |
| ● Nominal Voltage | | 3.7 V |
| ● Charge Condition | Max. Current | 4.8 A |
| | Voltage | 4.2V ± 0.03V |
| ● Discharge Condition | Continuous Current | 96 A |
| | Peak Current | 192 A |
| | Cut-off Voltage | 3.0V |
| ● Cycle Life (at 80% DOD) ²⁾ | | > 1,000Cycles |
| ● Operating Temp. | Charge | 0~40℃ |
| | Discharge | -20~60 ℃ |
| ● Dimension | Thickness (mm) | 10.4 ±0.2 |
| | Width (mm) | 43 ±0.5 |
| | Length (mm) | 140 ±2.0 |
| ● Weight (g) | | 115 ±4.0 |

1) Typical Capacity : 0.5CmA, 4.2~3.0V @25°C,
2) Voltage range : 4.15V ~3.40V

Discharge Characteristics

- ❖ Charge : CC-CV, 1.0C, 4.2V, 1/20C cut off @ 23±2℃
- ❖ Discharge : CC, Each C-rate, 2.7V cut off @ 23±2℃

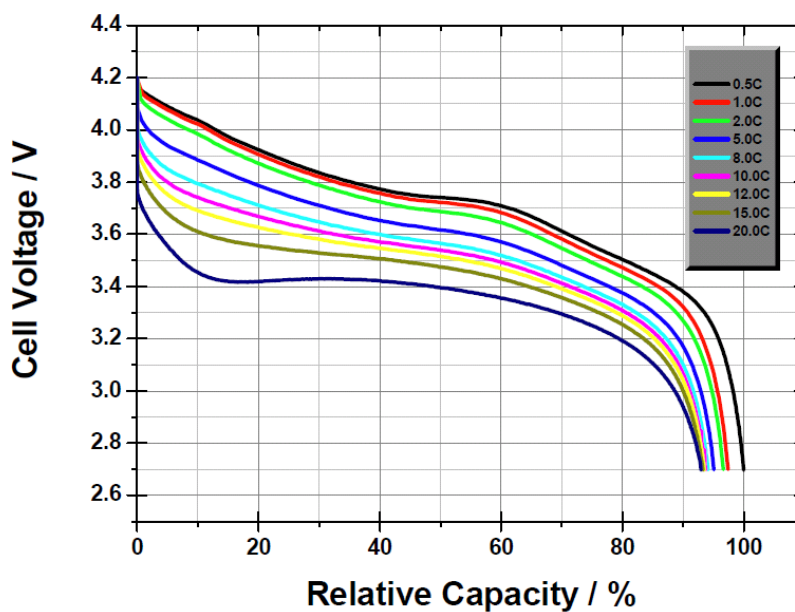


FIGURE VII-1 : EXTRAITS DE LA FICHE TECHNIQUE DE L'ACCUMULATEUR LITHIUM-POLYMERE 4,8 AH DE KOKAM [38]

3 ANNEXE 3 : SYNTHÈSE DES RESULTATS SUR LES ACCUMULATEURS

3.1 RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1.1 CARACTERISATION PAR CHRONOPOTENTIOMETRIE

Décharge d'un accumulateur par palier à courant constant à différentes températures

Essai à 20°C, $I_{acc,dech} = 4,8A$ et $C_n = 4,3Ah$:

| palier | | $i = 1$ | $i = 2$ | $i = 3$ | $i = 4$ | $i = 5$ | $i = 6$ | $i = 7$ |
|--------------|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| $SOC(i-1)$ | [%] | 100 | 91 | 70 | 31 | 14 | 6 | 4 |
| $E_o(i-1)$ | [V] | 4,18 | 4,08 | 3,88 | 3,73 | 3,54 | 3,35 | 3,17 |
| t_{dech} | [s] | 292 | 680 | 1280 | 540 | 241 | 92 | 55 |
| C_u | [A.h] | 0,39 | 0,91 | 1,72 | 0,72 | 0,32 | 0,12 | 0,07 |
| U_{acc} | [V] | 3,98 | 3,79 | 3,58 | 3,38 | 3,18 | 2,98 | 2,66 |
| $SOC(i)$ | [%] | 91 | 70 | 31 | 14 | 6 | 4 | 2 |
| $E_o(i)$ | [V] | 4,08 | 3,88 | 3,73 | 3,54 | 3,35 | 3,17 | 2,95 |
| R_{acc} | [mΩ] | 19,7 | 19,7 | 30,5 | 32,5 | 35,4 | 41 | 60,3 |
| $\Delta V'$ | [V] | 0,051 | 0,053 | 0,056 | 0,061 | 0,086 | 0,1 | 0,11 |
| R' | [mΩ] | 10,6 | 11,0 | 11,6 | 12,6 | 17,8 | 20,7 | 23,8 |
| $\Delta V''$ | [V] | 0,053 | 0,054 | 0,059 | 0,079 | 0,098 | 0,12 | 0,15 |
| R'' | [mΩ] | 11,0 | 11,2 | 12,2 | 16,3 | 20,3 | 23,8 | 30,8 |
| $R_{eq,d}$ | [mΩ] | 8,7 | 8,5 | 18,3 | 16,2 | 15,1 | 17,2 | 29,4 |
| T_{acc} | [°C] | 16,0 ^{+0,5} _{-0,5} | 15,7 ^{+0,5} _{-0,5} | 15,7 ^{+1,5} _{-0,5} | 17,0 ^{+1,5} ₋₁ | 15,5 ^{+1,5} _{-0,5} | 14,9 ⁺¹ _{-0,5} | 14,0 ^{+0,5} _{-1,5} |

TABLEAU VII-1 : RESULTATS EXPERIMENTAUX – DECHARGE PAR PALIER D'UN ACCUMULATEUR A 20°C

Essai à 40°C, $I_{acc,dech} = 4,8A$ et $C_n = 4,4Ah$:

| palier | | $i = 1$ | $i = 2$ | $i = 3$ | $i = 4$ | $i = 5$ | $i = 6$ |
|--------------|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| $SOC(i-1)$ | [%] | 100 | 87 | 63 | 24 | 10 | 6 |
| $E_o(i-1)$ | [V] | 4,19 | 4,04 | 3,84 | 3,66 | 3,45 | 3,26 |
| t_{dech} | [V] | 416 | 807 | 1296 | 469 | 137 | 105 |
| C_u | [s] | 0,56 | 1,08 | 1,74 | 0,63 | 0,18 | 0,14 |
| U_{acc} | [A.h] | 3,99 | 3,79 | 3,58 | 3,38 | 3,18 | 2,52 |
| $SOC(i)$ | [V] | 87 | 63 | 24 | 10 | 6 | 3 |
| $E_o(i)$ | [%] | 4,04 | 3,84 | 3,66 | 3,45 | 3,26 | 2,84 |
| R_{acc} | [V] | 11,2 | 11,6 | 16,8 | 15,1 | 18,2 | 66,7 |
| $\Delta V'$ | [mΩ] | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| R' | [mΩ] | 6,6 | 7,0 | 7,0 | 8,1 | 10,2 | 10,6 |
| $\Delta V''$ | [V] | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,10 |
| R'' | [mΩ] | 7,0 | 7,0 | 8,1 | 9,1 | 10,7 | 19,7 |
| $R_{eq,d}$ | [mΩ] | 4,1 | 4,6 | 8,7 | 6,0 | 7,5 | 47,0 |
| T_{acc} | [°C] | 35,8 ^{+0,5} _{-0,5} | 34,9 ^{+0,5} _{-0,5} | 34,6 ^{+1,5} _{-0,5} | 34,1 ^{+0,5} _{-0,5} | 33,9 ^{+0,5} _{-0,5} | 33,6 ⁺¹ _{-2,5} |

TABLEAU VII-2 : RESULTATS EXPERIMENTAUX – DECHARGE PAR PALIER D'UN ACCUMULATEUR A 40°C

Essai à 0°C, $I_{acc_dech} = 4,8A$ et $C_n = 4,15Ah$:

| palier | | $i = 1$ | $i = 2$ | $i = 3$ | $i = 4$ | $i = 5$ |
|--------------|-------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| $SOC(i-1)$ | [%] | 100 | 84 | 60 | 29 | 15 |
| $E_0(i-1)$ | [V] | 4,18 | 3,99 | 3,82 | 3,71 | 3,55 |
| t_{dech} | [s] | 497 | 753 | 972 | 430 | 386 |
| C_u | [A.h] | 0,67 | 1,01 | 1,30 | 0,58 | 0,52 |
| U_{acc} | [V] | 3,78 | 3,59 | 3,39 | 3,19 | 2,68 |
| $SOC(i)$ | [%] | 84 | 60 | 29 | 15 | 3 |
| $E_0(i)$ | [V] | 3,99 | 3,82 | 3,71 | 3,55 | 3,24 |
| R_{acc} | [mΩ] | 43,5 | 49,9 | 67,9 | 76,4 | 116,4 |
| $\Delta V'$ | [V] | 0,14 | 0,15 | 0,17 | 0,20 | 0,23 |
| R' | [mΩ] | 29,8 | 31,3 | 34,4 | 41,0 | 48,0 |
| $\Delta V''$ | [V] | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,21 | 0,24 |
| R'' | [mΩ] | 27,3 | 29,2 | 32,9 | 43,1 | 49,7 |
| $R_{eq,d}$ | [mΩ] | 16,2 | 20,7 | 35,0 | 33,4 | 66,7 |
| T_{acc} | [°C] | $-4,7^{+1,5}_{-0,5}$ | $-5,2^{+2}_{-0,5}$ | $-5,4^{+2,5}_{-1}$ | $-5,8^{+2,5}_{-0,5}$ | $-5,9^{+2,5}_{-0,5}$ |

TABLEAU VII-3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX – DECHARGE PAR PALIER D'UN ACCUMULATEUR A 0°C

Remarque générale : on note un écart de température entre la température de référence de la chambre climatique et celle mesurée en surface du composant. Cet écart est en moyenne de -5°C.

Les variables citées dans les tableaux précédents sont définies dans le tableau ci-après et sont relatives à la Figure II-19 dans le paragraphe II.3.4.2.

| Symbole ou Variable | Désignation / signification | Unité |
|---------------------|--|-------|
| C_n | Capacité nominale (mesurée) de l'accumulateur | [Ah] |
| C_u | Capacité utile, correspond à l'intégrale du courant I_{acc_dech} pendant la durée t_{dech} du créneau | [Ah] |
| $\Delta V'$ | Chute de tension à l'application du courant de décharge | [V] |
| $\Delta V''$ | Différence de potentiel à l'annulation du courant | [V] |
| $E_0(i-1)$ | Tension à vide avant l'application du créneau de courant | [V] |
| $E_0(i)$ | Tension à vide après stabilisation (période d'équilibre) | [V] |
| I_{acc_dech} | Courant de décharge d'un accumulateur | [A] |
| R_{acc} | Résistance de l'accumulateur, donnée par la relation II-8 | [Ω] |
| R' | Résistance associée à la chute de tension $\Delta V'$, selon II-9 | [Ω] |
| R'' | Résistance associée à la différence de potentiel $\Delta V''$, selon II-10 | [Ω] |
| $R_{eq,d}$ | Résistance équivalente, représentative du phénomène de diffusion | [Ω] |
| $SOC(i-1)$ | Etat de charge avant l'application du créneau de courant | [%] |
| $SOC(i)$ | Etat de charge après l'application du créneau de courant | [%] |
| T_{acc} | Température de l'accumulateur | [°C] |
| t_{dech} | Temps d'application du courant de décharge | [s] |
| U_{acc} | Tension de l'accumulateur relevée avant l'annulation du courant de décharge | [V] |

$$SOC(i) = SOC(i - 1) - \frac{C_u}{C_n}$$

VII-6

3.1.2 CARACTERISATION PAR SPECTROMETRIE D'IMPEDANCE ELECTROCHIMIQUE

Spectres à 0°C :

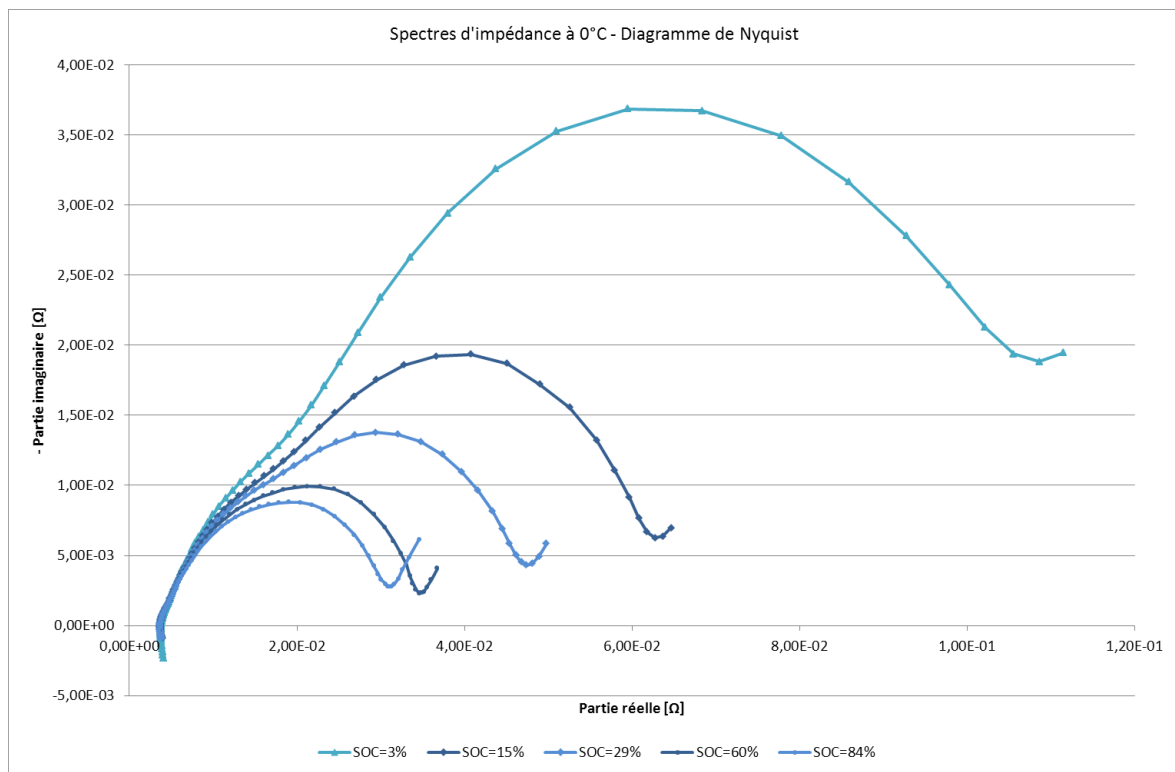


FIGURE VII-2 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST A 0°C A DIFFERENTS ETATS DE CHARGE

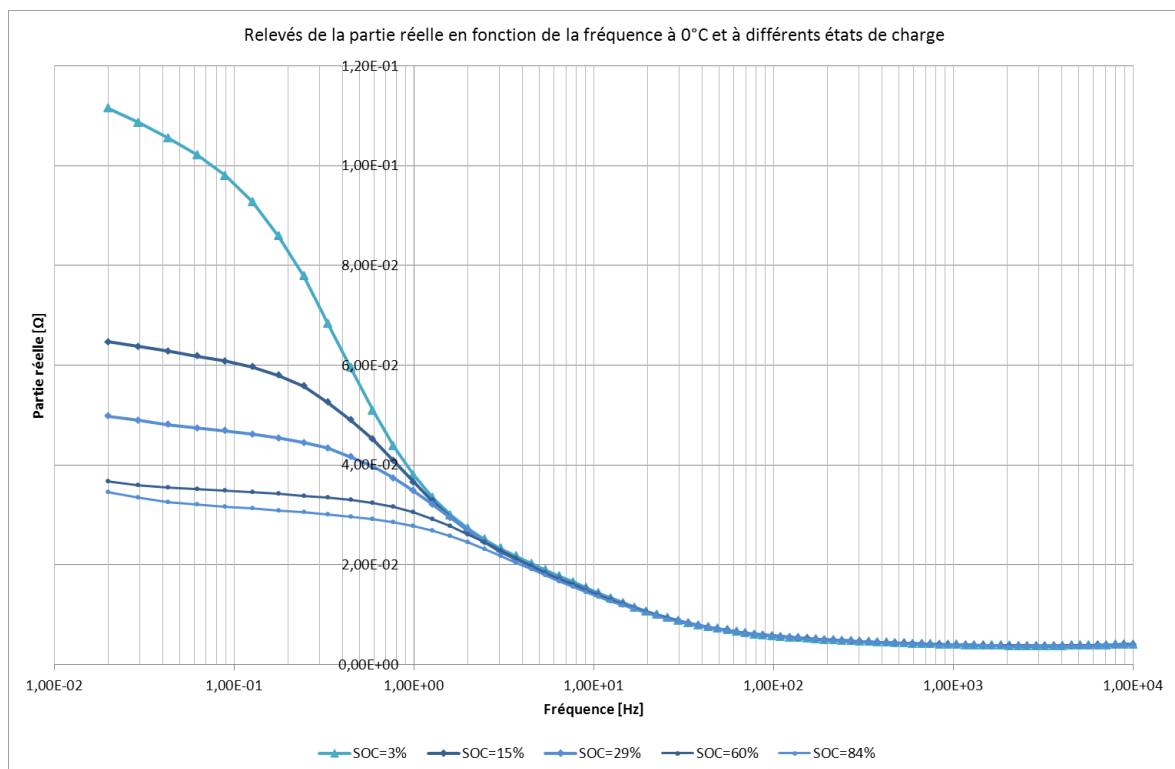


FIGURE VII-3 : RELEVES DE LA PARTIE REELLE EN FONCTION DE LA FREQUENCE A 0°C ET A DIFFERENTS ETATS DE CHARGE

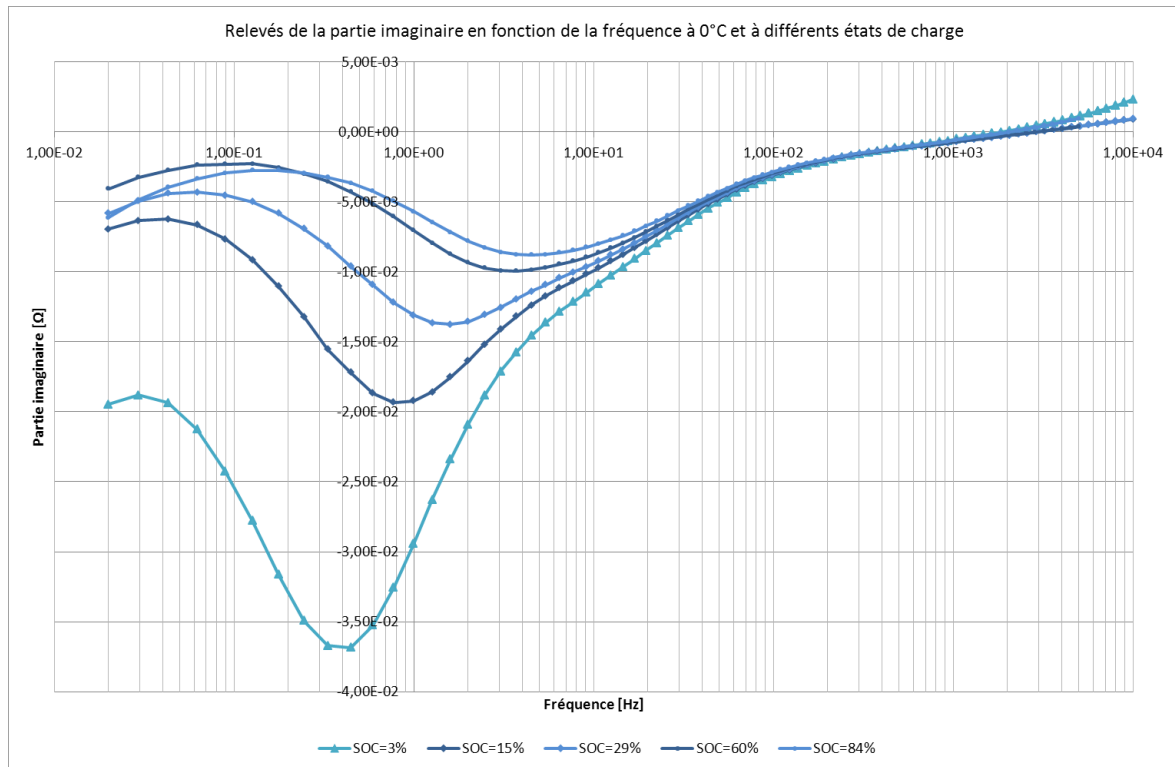


FIGURE VII-4 : RELEVES DE LA PARTIE IMAGINAIRE EN FONCTION DE LA FREQUENCE A 0°C ET A DIFFERENTS ETATS DE CHARGE

Résultats de l'identification des paramètres à partir des spectres expérimentaux à 0°C :

| SOC | E_{th} | L_{f1} | R_{Ω} | R_{tc} | C_{dc} |
|-----|----------|--------------------|---------------------|----------------------|----------|
| [%] | [V] | [H] | [Ω] | [Ω] | [F] |
| 84 | 3,99 | $30 \cdot 10^{-9}$ | $3,6 \cdot 10^{-3}$ | $27,0 \cdot 10^{-3}$ | 1,28 |
| 60 | 3,83 | $10 \cdot 10^{-9}$ | $3,6 \cdot 10^{-3}$ | $30,5 \cdot 10^{-3}$ | 1,38 |
| 29 | 3,71 | $10 \cdot 10^{-9}$ | $3,6 \cdot 10^{-3}$ | $42,8 \cdot 10^{-3}$ | 2,27 |

| SOC | R_d | τ_d | R_1 | R_2 | R_3 | $C_1=C_2=C_3$ |
|-----|--------------------|----------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| [%] | [Ω] | [s] | [Ω] | [Ω] | [Ω] | [F] |
| 84 | $13 \cdot 10^{-3}$ | 130 | $10,5 \cdot 10^{-3}$ | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | $0,4 \cdot 10^{-3}$ | 5000 |
| 60 | $15 \cdot 10^{-3}$ | 150 | $12,2 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $0,5 \cdot 10^{-3}$ | 5000 |
| 29 | $30 \cdot 10^{-3}$ | 300 | $24,3 \cdot 10^{-3}$ | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | $0,9 \cdot 10^{-3}$ | 5000 |

TABLEAU VII-4 : RESULTATS DE L'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE DYNAMIQUE A 0°C

Résultats de l'identification des paramètres à partir des spectres expérimentaux à 40°C :

| SOC | E_{th} | L_{f1} | R_{Ω} | R_{tc} | C_{dc} |
|-----|----------|--------------------|---------------------|----------------------|----------|
| [%] | [V] | [H] | [Ω] | [Ω] | [F] |
| 63 | 3,84 | $40 \cdot 10^{-9}$ | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | $1,25 \cdot 10^{-3}$ | 5,01 |
| 24 | 3,66 | $30 \cdot 10^{-9}$ | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | $2,05 \cdot 10^{-3}$ | 3,44 |
| 10 | 3,45 | $50 \cdot 10^{-9}$ | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | $3,01 \cdot 10^{-3}$ | 4,23 |

| SOC | R_d | τ_d | R_1 | R_2 | R_3 | $C_1=C_2=C_3$ |
|-----|--------------------|----------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| [%] | [Ω] | [s] | [Ω] | [Ω] | [Ω] | [F] |
| 63 | $9 \cdot 10^{-3}$ | 90 | $7,3 \cdot 10^{-3}$ | $0,8 \cdot 10^{-3}$ | $0,3 \cdot 10^{-3}$ | 5000 |
| 24 | $11 \cdot 10^{-3}$ | 100 | $8,9 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ | $0,4 \cdot 10^{-3}$ | 4500 |
| 10 | $18 \cdot 10^{-3}$ | 150 | $14,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,7 \cdot 10^{-3}$ | $0,7 \cdot 10^{-3}$ | 4000 |

TABLEAU VII-5 : RESULTATS DE L'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE DYNAMIQUE A 40°C

Spectres à 40°C :

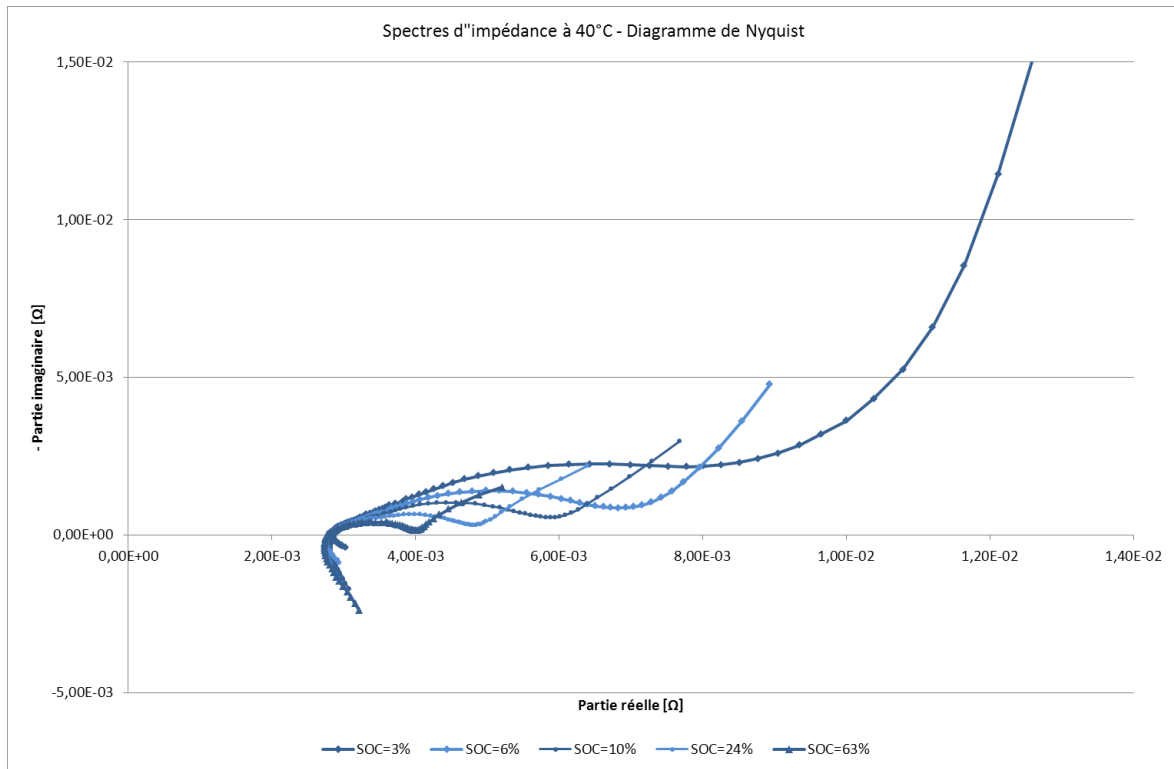


FIGURE VII-5 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST A 40°C A DIFFERENTS ETATS DE CHARGE

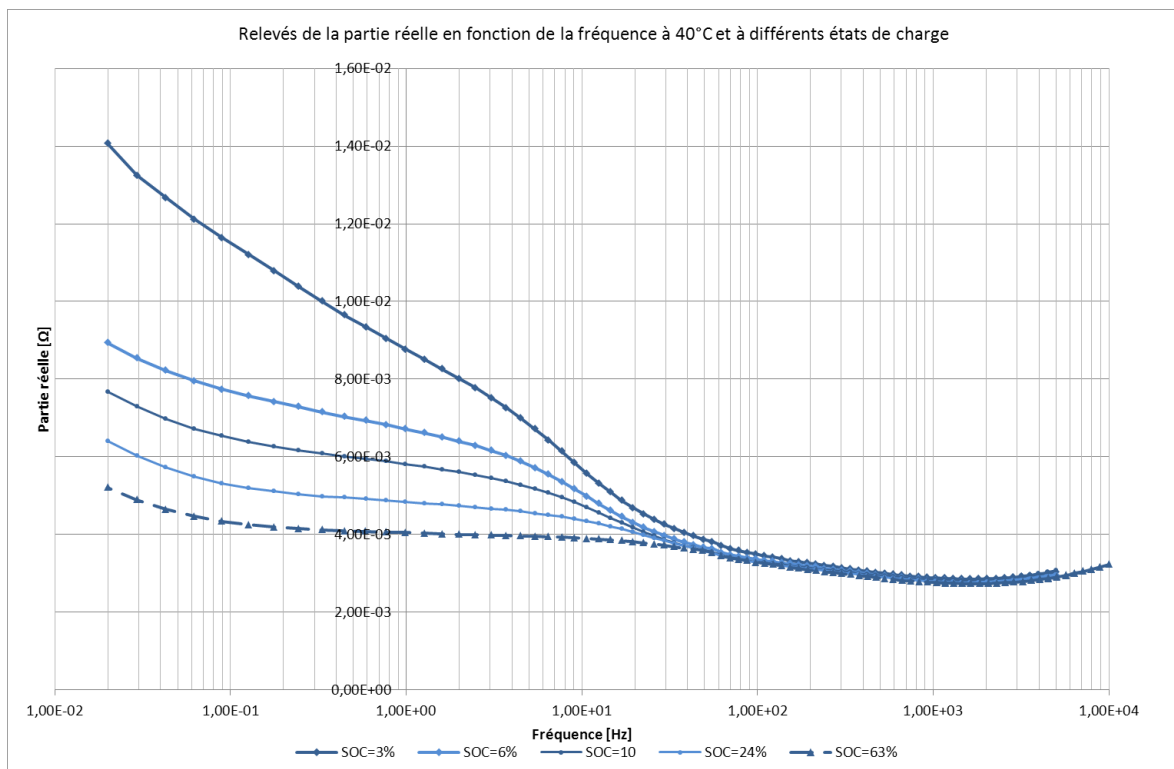


FIGURE VII-6 : RELEVES DE LA PARTIE REELLE EN FONCTION DE LA FREQUENCE A 40°C ET A DIFFERENTS ETATS DE CHARGE

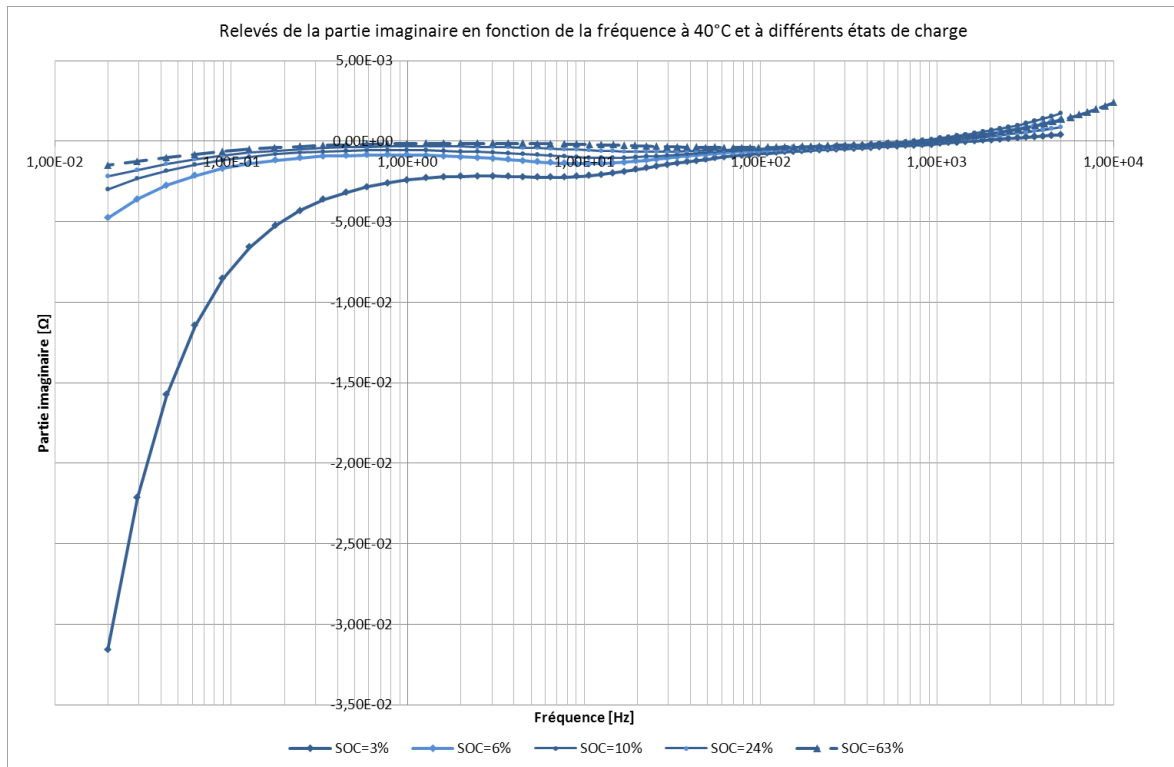


FIGURE VII-7 : RELEVÉS DE LA PARTIE IMAGINAIRE EN FONCTION DE LA FREQUENCE A 40°C ET A DIFFERENTS ETATS DE CHARGE

3.2 RESULTATS DE SIMULATION

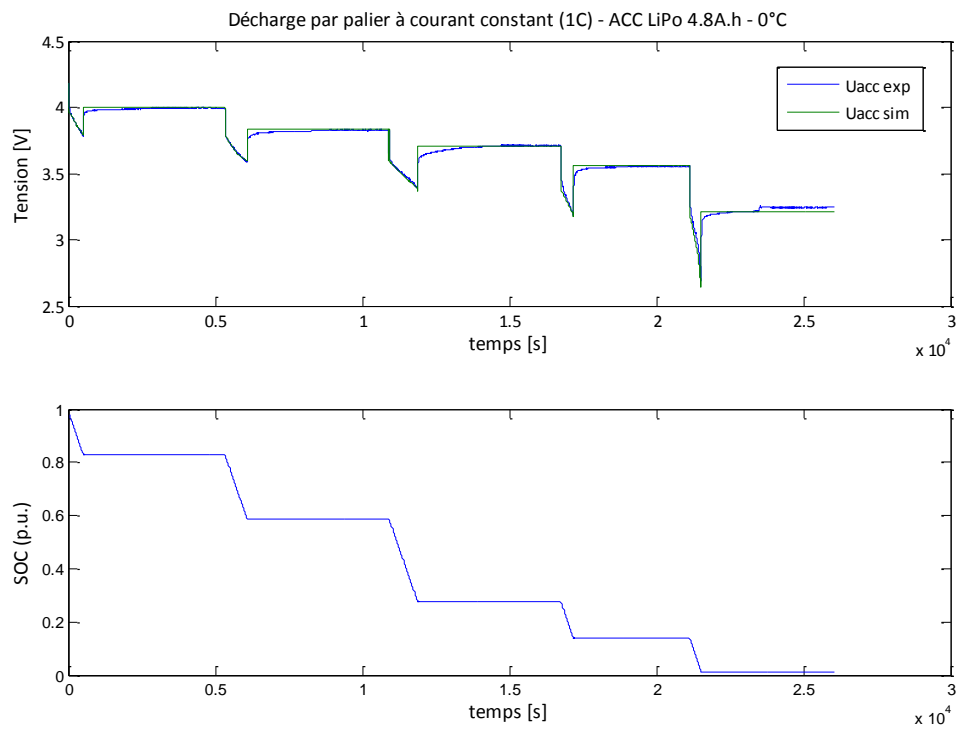


FIGURE VII-8 : SIMULATION DU MODELE QUASI-STATIQUE EN COMPARAISON AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX (A 0°C)

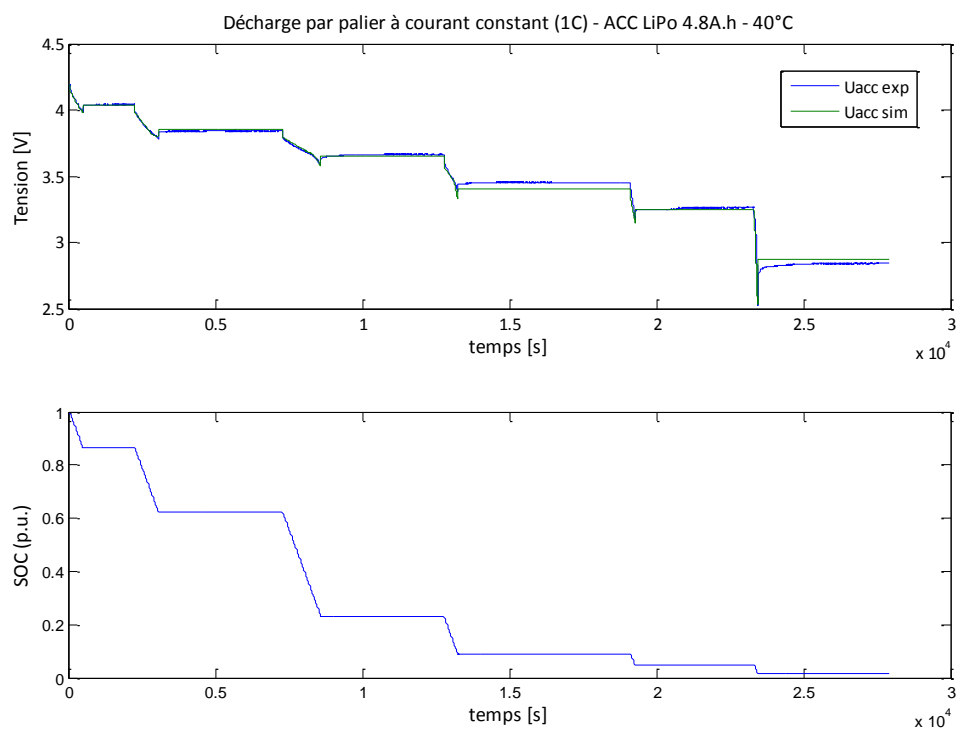


FIGURE VII-9 : SIMULATION DU MODELE QUASI-STATIQUE EN COMPARAISON AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX (A 40°C)

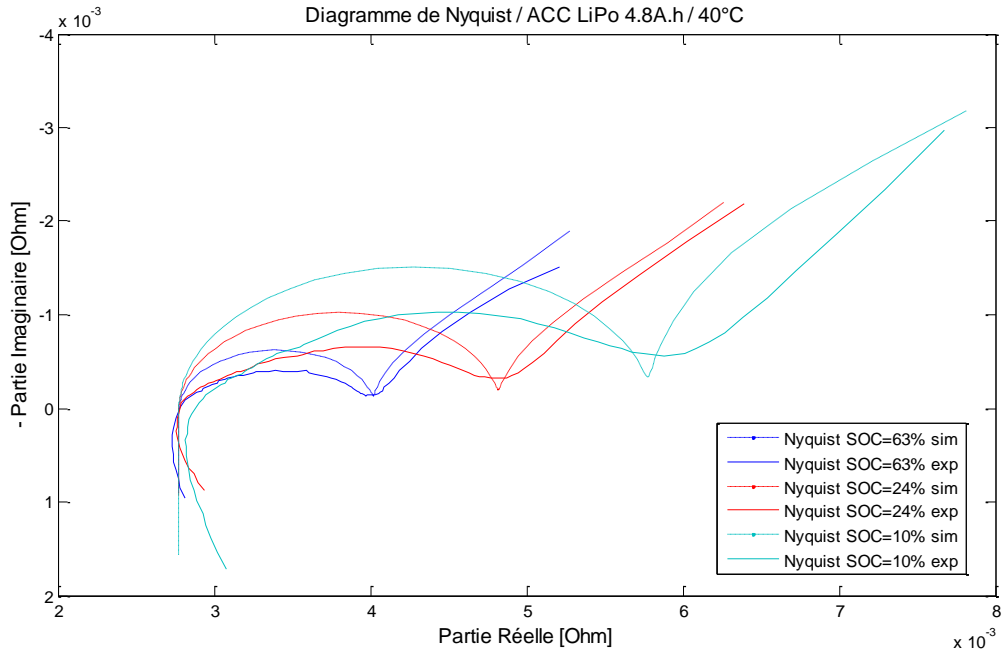


FIGURE VII-10 : SPECTRES D'IMPEDANCE A 40°C – COMPARAISON ENTRE EXPERIMENTATION ET SIMULATION DU MODELE

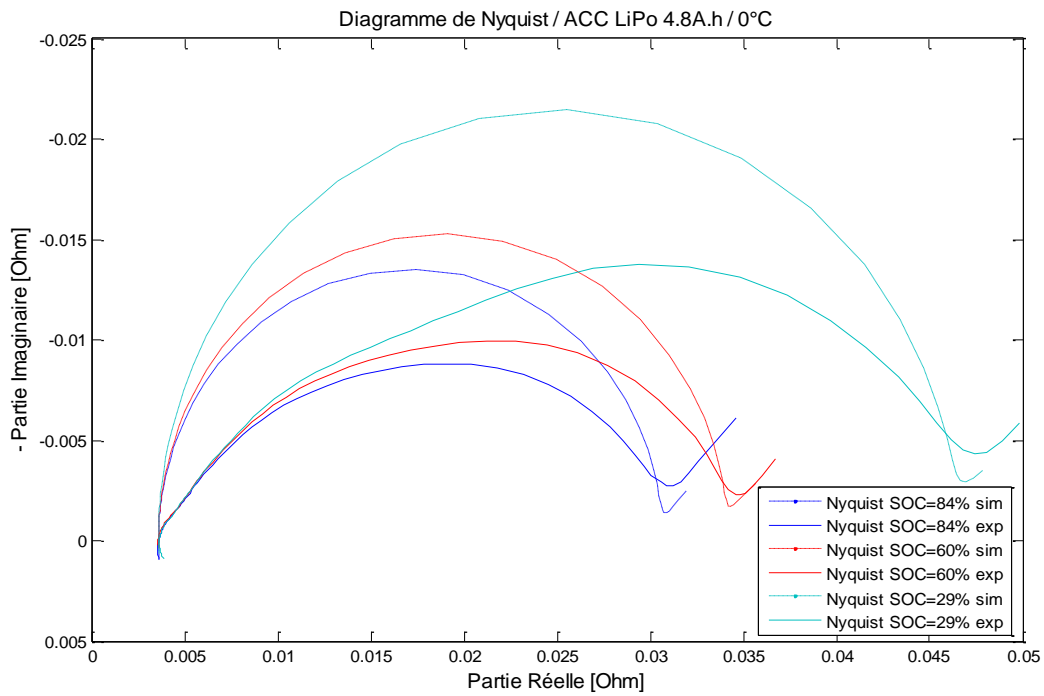


FIGURE VII-11 : SPECTRES D'IMPEDANCE A 0°C – COMPARAISON ENTRE EXPERIMENTATION ET SIMULATION DU MODELE

4 ANNEXE 4 : FICHES TECHNIQUES – SUPERCONDENSATEURS

4.1 SUPERCONDENSATEURS MAXWELL

DATASHEET
MC POWER SERIES 650 F - 3,000 F ULTRACAPACITORS

BCAP0650 P270
BCAP1200 P270
BCAP1500 P270
BCAP2000 P270
BCAP3000 P270



PRODUCT SPECIFICATIONS

| CAPACITANCE | BCAP0650 | BCAP1200 | BCAP1500 | BCAP2000 | BCAP3000 |
|--|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
| Nominal capacitance | 650 F | 1,200 F | 1,500 F | 2,000 F | 3,000 F |
| Tolerance capacitance | | | +20% / -0% | | |
| VOLTAGE | | | | | |
| Rated voltage | | | 2.7 V | | |
| Surge voltage | | | 2.8 V | | |
| Maximum operating voltage | | | N/A | | |
| Isolation voltage | | | N/A | | |
| RESISTANCE | | | | | |
| ESR, DC | 0.8 mΩ | 0.58 mΩ | 0.47 mΩ | 0.35 mΩ | 0.29 mΩ |
| Resistance tolerance | | | Max. | | |
| Thermal resistance (Rth) | 6.5°C/W | 5.3°C/W | 4.5°C/W | 3.8°C/W | 3.2°C/W |
| TEMPERATURE | | | | | |
| Operating temperature range | | | -40°C to +65°C | | |
| Max. ambient operating temp. | | | | | |
| Storage temperature range | | | -40°C to +70°C | | |
| Temperature characteristics ¹ | | | | | |
| Capacitance change | | | ± 5% at 25°C | | |
| Internal resistance change | | | 150% at 25°C | | |
| POWER | | | | | |
| Pd | 5,400 W/kg | 5,000 W/kg | 5,800 W/kg | 6,200 W/kg | 5,400 W/kg |
| Pmax | 15,100 W/kg | 13,800 W/kg | 16,200 W/kg | 17,500 W/kg | 13,800 W/kg |
| ENERGY | | | | | |
| E _{max} | 3.29 Wh/kg | 4.05 Wh/kg | 4.75 Wh/kg | 5.06 Wh/kg | 5.52 Wh/kg |
| LIFESPAN | | | | | |
| Endurance ² | | | | | |
| Capacitance change | | | 20% | | |
| Internal resistance change | | | 60% | | |
| Life test ³ | | | | | |
| Capacitance change | | | 30% | | |
| Internal resistance | | | 150% | | |
| CYCLES | | | | | |
| Capacitance change ⁴ | | | 30% | | |
| Internal resistance ⁴ | | | 150% | | |

DATASHEET
MC POWER SERIES 650 F - 3,000 F ULTRACAPACITORS



BCAP0650 P270
BCAP1200 P270
BCAP1500 P270
BCAP2000 P270
BCAP3000 P270



PRODUCT SPECIFICATIONS (cont.)

| CURRENT | BCAP0650 | BCAP1200 | BCAP1500 | BCAP2000 | BCAP3000 |
|--|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| Leakage current ⁵ | 1.5 mA | 2.7 mA | 3.0 mA | 4.2 mA | 5.2 mA |
| Short circuit current (Isc) ⁶ | 3,500 A | 3,750 A | 3,900 A | 4,300 A | 4,800 A |
| Maximum continuous current | 105 A | 110 A | 115 A | 125 A | 150 A |
| Maximum peak current, 1 sec | 875 A | 1,600 A | 2,000 A | 2,700 A | 4,000 A |
| CONNECTION | | | | | |
| Terminal | Threaded or Weldable | | | | |
| MONITORING (IN-BUILT) | | | | | |
| Balancing | N/A | | | | |
| Fan voltage | N/A | | | | |
| Thermal monitoring | N/A | | | | |
| SIZE | | | | | |
| Dimensions (L x W x H) (mm) | See drawings | | | | |
| Weight | 0.2kg | 0.3kg | 0.32kg | 0.4kg | 0.55kg |
| RATINGS | | | | | |
| Vibration resistance | SAE J2380 | | | | |

¹ Within ± #% of initial measured value at #°C.
² After 1,500 hours application of rated voltage at 65°C. Within % of initial specified value.
³ After 10 years at rated voltage and 25°C. Within % of initial specified value.
⁴ Within % of initial specified value.
⁵ After 72 hours at 25°C. Initial leakage current can be higher.
⁶ **CAUTION:** C current possible with short circuit from UR. Do not use as an operating current.

MOUNTING RECOMMENDATIONS

Do not reverse polarity.
 Maximum torque for M12 screw terminals is 10Nm.
 Cells are designed to be connected into series or parallel strings.
 Clean terminals before mounting.

MARKINGS

Capacitors are marked with the following information - Rated capacitance and rated voltage as well as energy/power type indication in the product naming. Serial number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking.

FEATURES AND BENEFITS

- Ultra-low internal resistance
- Highest power performance available
- Lowest RC time constant
- 2.7 V operating voltage
- Over 1,000,000 duty cycles
- Proprietary material science and packaging technology
- Threded terminal or weldable post versions

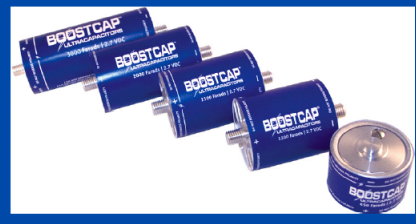
APPLICATIONS

- Automotive subsystems
- Hybrid drive trains
- Rail system power
- Transportation
- Utility vehicles

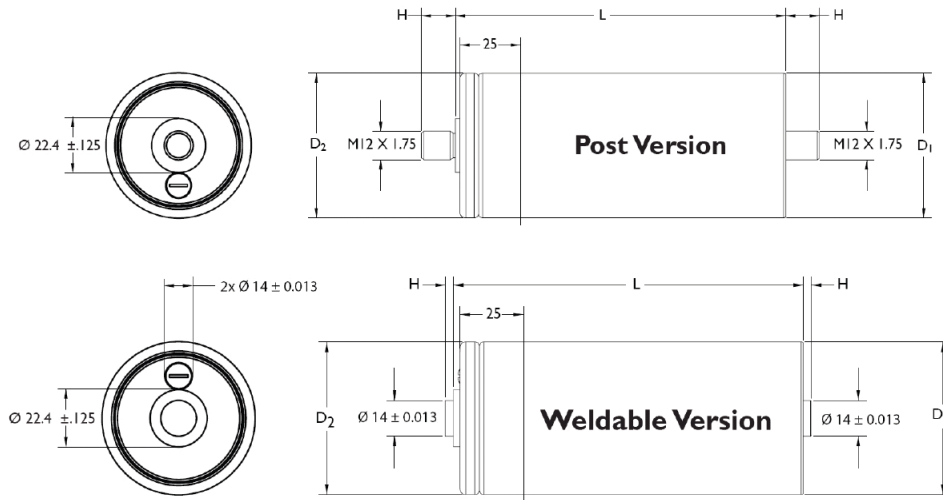
DATASHEET
MC POWER SERIES 650 F - 3,000 F ULTRACAPACITORS



BCAP0650 P270
BCAP1200 P270
BCAP1500 P270
BCAP2000 P270
BCAP3000 P270



DIMENSIONS (mm)



| Part Number | Volume | L (±0.3mm) | H (±0.5mm) | D ₁ (±0.2mm) | D ₂ (±0.7mm) |
|-------------------|---------|------------------|------------|-------------------------|-------------------------|
| BCAP0650 P270 T04 | 0.211 L | 51.5 mm (±0.5mm) | 14mm | 60.4mm | 60.7mm |
| BCAP0650 P270 T05 | 0.15 L | 51.5 mm (±0.5mm) | 3.18 mm | 60.4mm | 60.7mm |
| BCAP1200 P270 T04 | 0.294 L | 74 mm | 14mm | 60.4mm | 60.7mm |
| BCAP1200 P270 T05 | 0.233 L | 74 mm | 3.18 mm | 60.4mm | 60.7mm |
| BCAP1500 P270 T04 | 0.325 L | 85 mm | 14mm | 60.4mm | 60.7mm |
| BCAP1500 P270 T05 | 0.264 L | 85 mm | 3.18 mm | 60.4mm | 60.7mm |
| BCAP2000 P270 T04 | 0.373 L | 102 mm | 14mm | 60.4mm | 60.7mm |
| BCAP2000 P270 T05 | 0.312 L | 102 mm | 3.18 mm | 60.4mm | 60.7mm |
| BCAP3000 P270 T04 | 0.475 L | 138 mm | 14mm | 60.4mm | 60.7mm |
| BCAP3000 P270 T05 | 0.141 L | 138 mm | 3.18 mm | 60.4mm | 60.7mm |

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.

Maxwell Technologies, Inc.
Worldwide Headquarters
 9244 Balboa Avenue
 San Diego, CA 92123
 USA
 Tel: +1 858 503 3300
 US Free Call: +1 877 511 4324
 Fax: +1 858 503 3301

Maxwell Technologies SA
 CH-1728 Rossens
 Switzerland
 Tel: +41 (0)26 411 85 00
 Fax: +41 (0)26 411 85 05

Maxwell Technologies, GmbH
 Brucker Strasse 21
 D-82205 Gilching
 Germany
 T: +49 (0)8105 24 16 10
 F: +49 (0)8105 24 16 19

Maxwell Technologies, Inc.
Shanghai Representative Office
 Rm.2104, Suncome Liauw's Plaza
 738 Shang Cheng Road, Pudong New Area
 Shanghai 200120, P.R. China
 Tel: +86 21 5836 5733
 Fax: +86 21 5836 5620

Online: www.maxwell.com • Email: info@maxwell.com

4.2 SUPERCONDENSATEURS BATSCAP

Supercapacités - cellules

Des solutions innovantes et compétitives

Caractéristiques principales

- Puissance très élevée
- Très faible résistance série
- Plusieurs millions de cycles charge/décharge
- Large domaine de température de fonctionnement
- Cyclage profond sans influence sur la durée de vie
- Fin de vie prévisible
- Sans maintenance
- Technologie sûre: pas de fuite de gaz ou de liquide

Spécificités

- Étanchéité assurée même en fin de vie
- Terminaux en aluminium M12 x 14
- Gaine en PVC
- Bornes spécifiques pour soudure laser entre cellules

Une famille de produits

Applications

Automobiles, camions & bus

Stop & start
Soft/mild hybrid
Full hybrid & 100% électrique

Véhicules ferroviaires

Équipements de manutention industrielle

Batscap

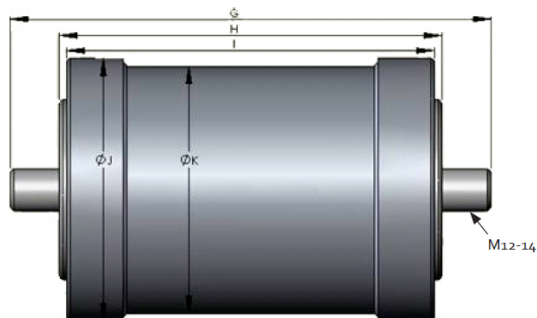
supercaps@batscap.com
Tél. +33 (0)2 98 66 72 00

www.batscap.com

L'engagement à long
terme d'un groupe
www.bollor.com



Dimensions (sans gaine)

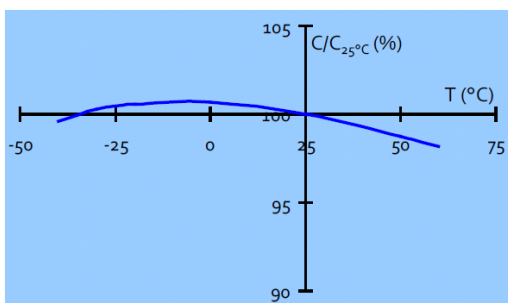


| (en mm) | G | H | I | J | K |
|---------|------|------|------|------|----|
| C650F | 83.5 | 55.5 | 51.5 | 60.5 | 56 |
| C1200F | 106 | 78 | 74 | 60.5 | 56 |
| C2000F | 134 | 106 | 102 | 60.5 | 56 |
| C3000F | 136 | 108 | 104 | 74.5 | 70 |
| C5000F | 200 | 172 | 168 | 74.5 | 70 |
| C9000F | 202 | 174 | 170 | 94.5 | 90 |

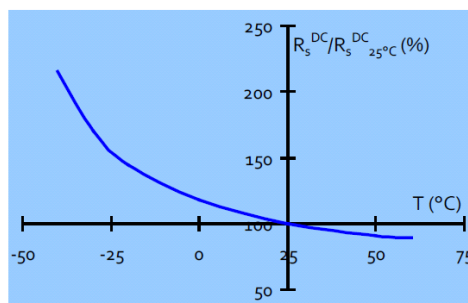
Spécifications

| | Conditions | Unités | C650F | C1200F | C2000F | C3000F | C5000F | C9000F |
|-------------------------------|--------------------------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Capacité | $T_A = 25^\circ\text{C}$ | F | 650 | 1200 | 2000 | 3000 | 5000 | 9000 |
| Tension nominale | | V | 2.7 | | | | | |
| Puissance spécifique | Valeur max | kW/kg | 21.2 | 23.3 | 26.0 | 25.4 | 16.5 | 20.8 |
| | @ 10 s / 50% Pdd | kW/kg | 0.8 | 1.1 | 1.2 | 1.2 | 1.3 | 1.3 |
| Énergie spécifique | Max. stockée | Wh/kg | 3.3 | 4.7 | 5.6 | 5.5 | 5.9 | 6.2 |
| Résistance série DC | $T_A = 25^\circ\text{C}$ | mΩ | 0.90 | 0.50 | 0.35 | 0.25 | 0.20 | 0.10 |
| Température de fonctionnement | | °C | -35 à +65 °C | | | | | |
| Température max en surface | | °C | 70 °C | | | | | |
| Température de stockage | $V = 0\text{V}$ | °C | -35 à +70 °C | | | | | |
| Masse | | g | 200 | 260 | 350 | 550 | 850 | 1460 |
| Volume | terminaux exclus | l | 0.14 | 0.21 | 0.29 | 0.45 | 0.73 | 1.19 |

Note: Pour plus de détails, consultez le document Batscap sur les méthodes de mesure.



Impact de la température sur la capacité



Impact de la température sur la résistance série

Les spécifications sont sujettes à modification sans préavis

© 2007 Batscap. Tous droits réservés. Batscap et le logo Batscap sont des marques enregistrées de Batscap

Rev 1.0

www.batscap.com

5 ANNEXE 5 : SYNTHÈSE DES RESULTATS SUR LES SUPERCONDENSATEURS

5.1 RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.1.1 CARACTERISATION PAR CHRONOPOTENTIOMETRIE

5.1.1.1 RELEVES EXPERIMENTAUX LORS D'UNE DECHARGE A COURANT CONSTANT

Dans ce paragraphe, sont donnés des exemples de relevés de la tension aux bornes des supercondensateurs et du courant appliqué pour la décharge des composants, à différentes températures.

Supercondensateur Maxwell 3000F à 25°C :

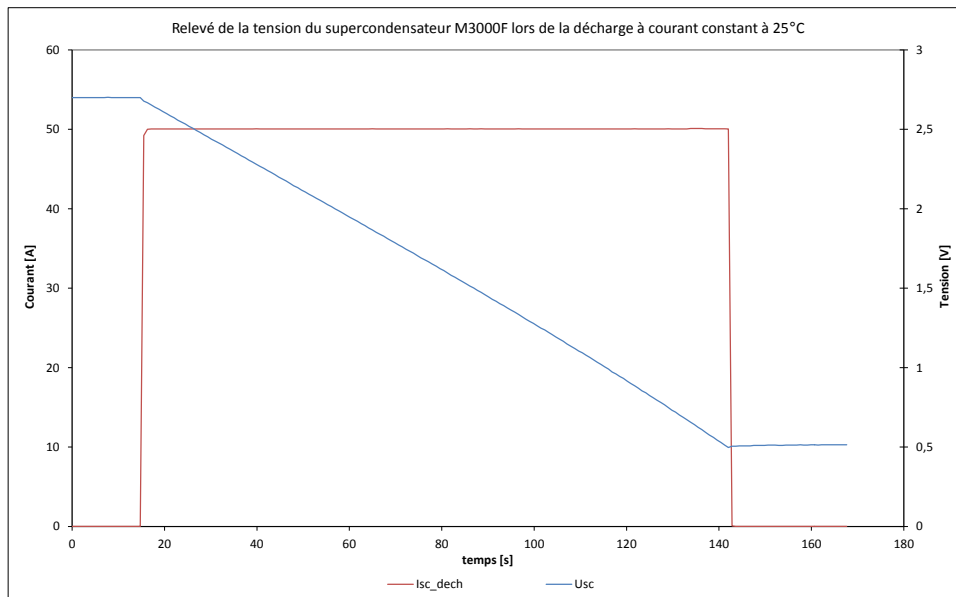


FIGURE VII-12 : RESULTATS EXPERIMENTAUX – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP MAXWELL 3000F A 25°C

Supercondensateur Maxwell 1200F à 40°C :

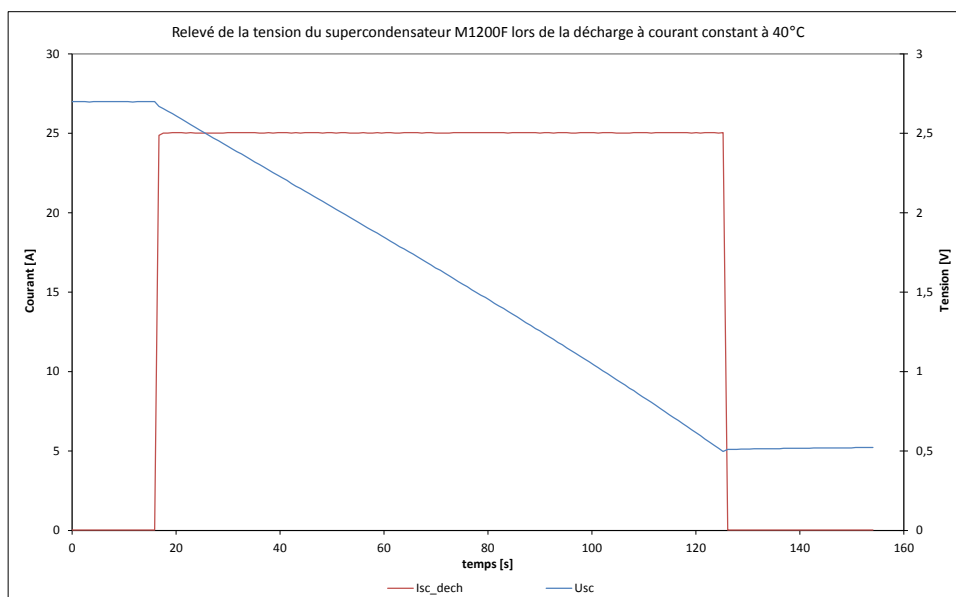


FIGURE VII-13 : RESULTATS EXPERIMENTAUX – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP MAXWELL 1200F A 40°C

Supercondensateur Maxwell 650F à 55°C :

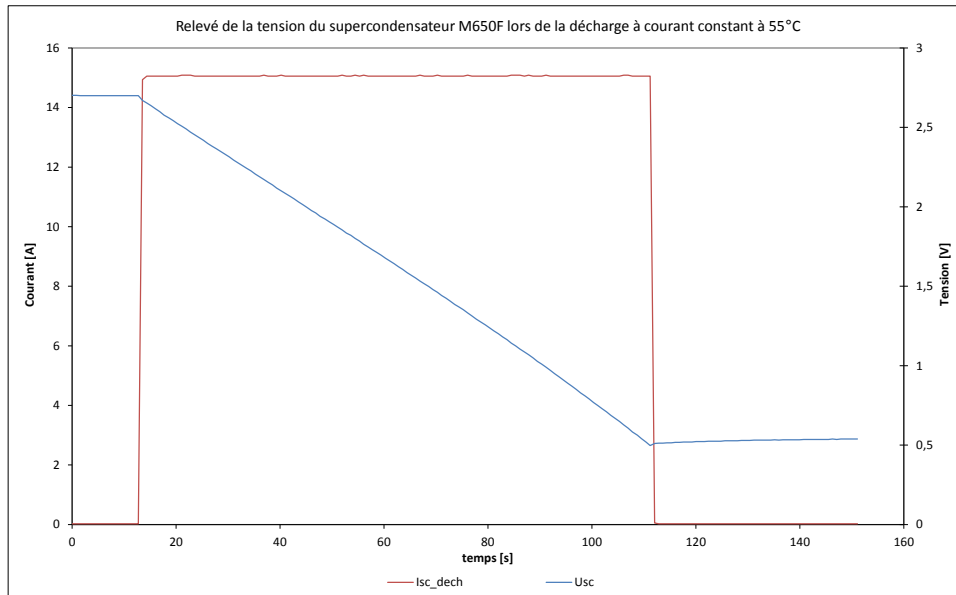


FIGURE VII-14 : RESULTATS EXPERIMENTAUX – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP MAXWELL 650F A 55°C

Supercondensateur Batscap 650F à 10°C :

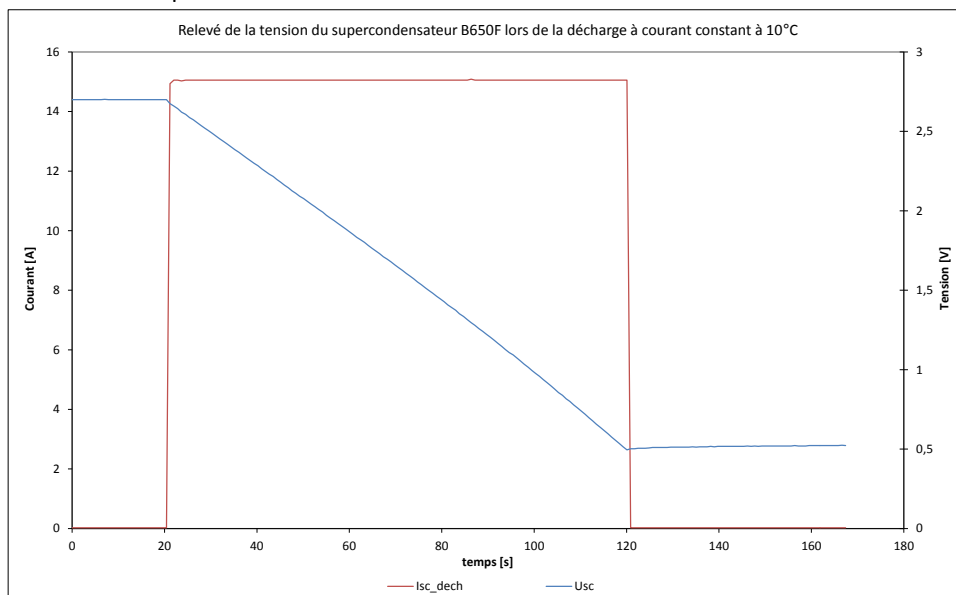


FIGURE VII-15 : RESULTATS EXPERIMENTAUX – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP BATSCAP 650F A 10°C

Supercondensateur Batscap1200F à -5°C :

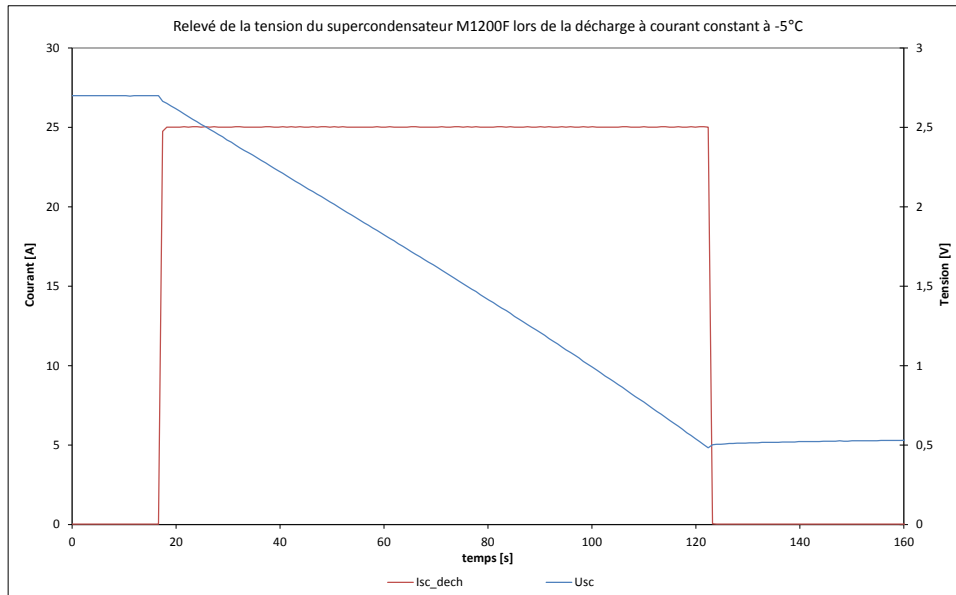


FIGURE VII-16 : RESULTATS EXPERIMENTAUX – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP BATSCAP 1200F A -5°C

Supercondensateur Batscap 3000F à -20°C :



FIGURE VII-17 : RESULTATS EXPERIMENTAUX – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP BATSCAP 3000F A -20°C

5.1.1.2 PARAMETRES DU MODELE STANDARD POUR LES SUPERCONDENSATEURS

Dans ce paragraphe, sont donnés les paramètres du modèle standard à différentes températures.

Supercondensateur Maxwell 3000F :

| T | [°C] | -19 | -4 | 10 | 24 | 37 | 52 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| C_{sc} | [F] | 3040 | 3040 | 3035 | 3030 | 3020 | 3010 |
| ESR_{DC} | [mΩ] | 0,35 | 0,30 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,39 |

TABLEAU VII-6 : PARAMETRES DU MODELE STANDARD – SCAP MAXWELL 3000F

Supercondensateur Batscap 3000F :

| | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| T | [°C] | -18 | -5 | 9 | 25 | 37 | 50 |
| C_{sc} | [F] | 2945 | 2940 | 2915 | 2930 | 2930 | 2915 |
| ESR_{DC} | [mΩ] | 0,54 | 0,37 | 0,45 | 0,46 | 0,40 | 0,40 |

TABLEAU VII-7 : PARAMETRES DU MODELE STANDARD – SCAP BATSCAP 3000F

Supercondensateur Maxwell 1200F :

| | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| T | [°C] | -19 | -5 | 10 | 23 | 37 | 55 |
| C_{sc} | [F] | 1285 | 1280 | 1280 | 1305 | 1295 | 1285 |
| ESR_{DC} | [mΩ] | 0,96 | 0,87 | 1,02 | 0,98 | 0,86 | 1,09 |

TABLEAU VII-8 : PARAMETRES DU MODELE STANDARD – SCAP MAXWELL 1200F

Supercondensateur Batscap1200F :

| | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| T | [°C] | -16 | -3 | 10 | 23 | 37 | 52 |
| C_{sc} | [F] | 1265 | 1250 | 1250 | 1250 | 1255 | 1255 |
| ESR_{DC} | [mΩ] | 1,40 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 1,11 | 1,05 |

TABLEAU VII-9 : PARAMETRES DU MODELE STANDARD – SCAP BATSCAP 1200F

Supercondensateur Maxwell 650F :

| | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| T | [°C] | -10 | 0 | 13 | 25 | 38 | 52 |
| C_{sc} | [F] | 695 | 690 | 690 | 690 | 690 | 705 |
| ESR_{DC} | [mΩ] | 1,54 | 1,50 | 1,14 | 1,74 | 1,60 | 1,99 |

TABLEAU VII-10 : PARAMETRES DU MODELE STANDARD – SCAP MAXWELL 650F

Supercondensateur Batscap 650F :

| | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| T | [°C] | -21 | -4 | 10 | 24 | 37 | 49 |
| C_{sc} | [F] | 720 | 715 | 715 | 735 | 725 | 715 |
| ESR_{DC} | [mΩ] | 1,48 | 1,37 | 1,18 | 1,32 | 1,01 | 1,05 |

TABLEAU VII-11 : PARAMETRES DU MODELE STANDARD – SCAP BATSCAP 650F

5.1.1.3 RELEVES EXPERIMENTAUX LORS D'UNE CHARGE PAR CRENEAU DE COURANT

Dans ce paragraphe, sont donnés des exemples de relevés de la tension aux bornes des supercondensateurs et du courant appliqué pour la charge des composants, à 25°C.

Supercondensateur Batscap 3000F à 25°C :

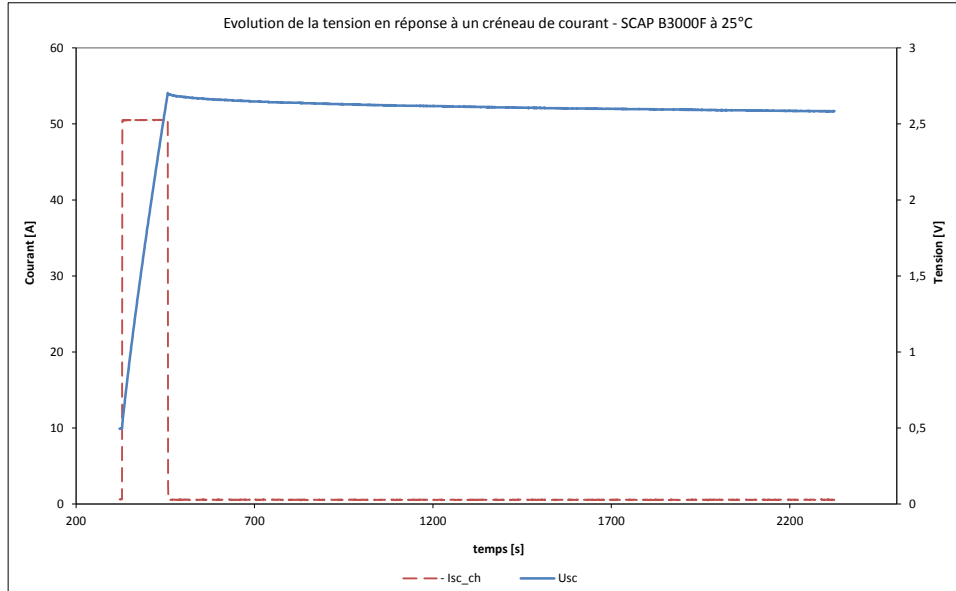


FIGURE VII-18 : RELEVÉ DE LA TENSION D'UN SUPERCONDENSATEUR B3000F EN REPONSE A UN CRENEAU DE COURANT

Supercondensateur Batscap 1200F à 25°C :

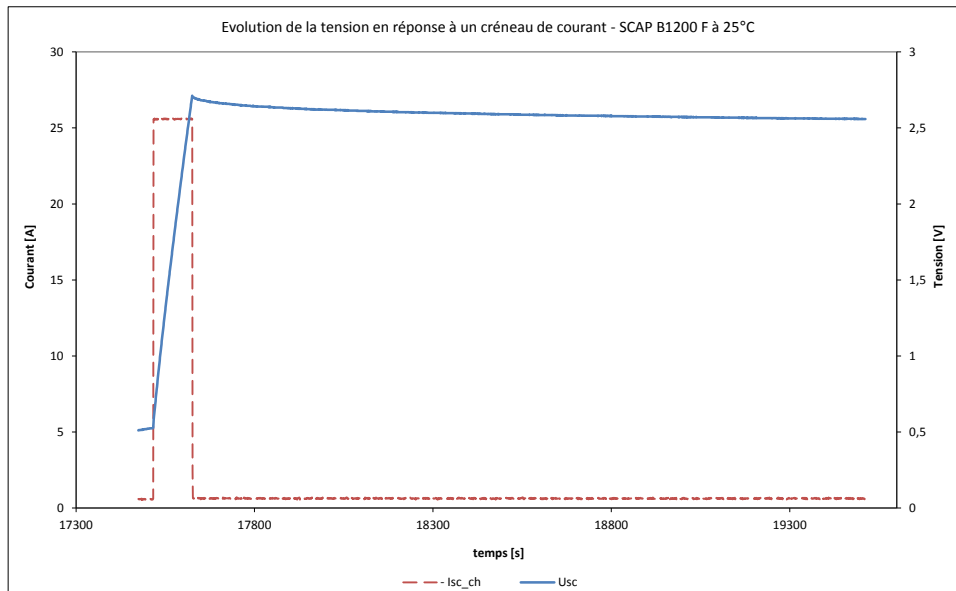


FIGURE VII-19 : RELEVÉ DE LA TENSION D'UN SUPERCONDENSATEUR B1200F EN REPONSE A UN CRENEAU DE COURANT

Supercondensateur Batscap 650F à 25°C :

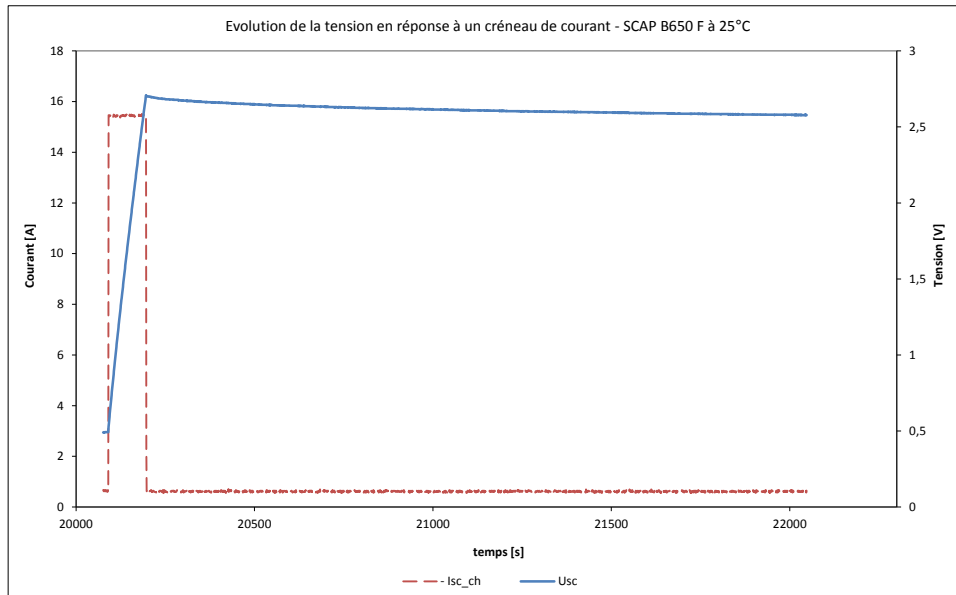


FIGURE VII-20 : RELEVÉ DE LA TENSION D'UN SUPERCONDENSATEUR B650F EN REPONSE A UN CRENEAU DE COURANT

5.1.1.4 PARAMETRES DU MODELE A DEUX BRANCHES POUR LES SUPERCONDENSATEURS

| Paramètres | Unité | Batscap 3000F | Batscap 1200F | Batscap 650F |
|------------|----------------------|---------------|---------------|--------------|
| R_i | [mΩ] | 0,46 | 0,91 | 1,32 |
| C_{i0} | [F] | 2100 | 980 | 570 |
| K | [F.V ⁻¹] | 500 | 180 | 90 |
| R_{rc} | [Ω] | 2 | 5,8 | 10 |
| C_{rc} | [F] | 100 | 200 | 10 |

TABLEAU VII-12 : PARAMETRES DU MODELE A DEUX BRANCHES R-C – SUPERCONDENSATEURS BATSCAP

5.1.2 CARACTERISATION PAR SPECTROMETRIE D'IMPEDANCE ELECTROCHIMIQUE

5.1.2.1 RELEVES DES SPECTRES D'IMPEDANCE A DIFFERENTES TEMPERATURES ET TENSIONS

Supercondensateur Batscap 3000F :

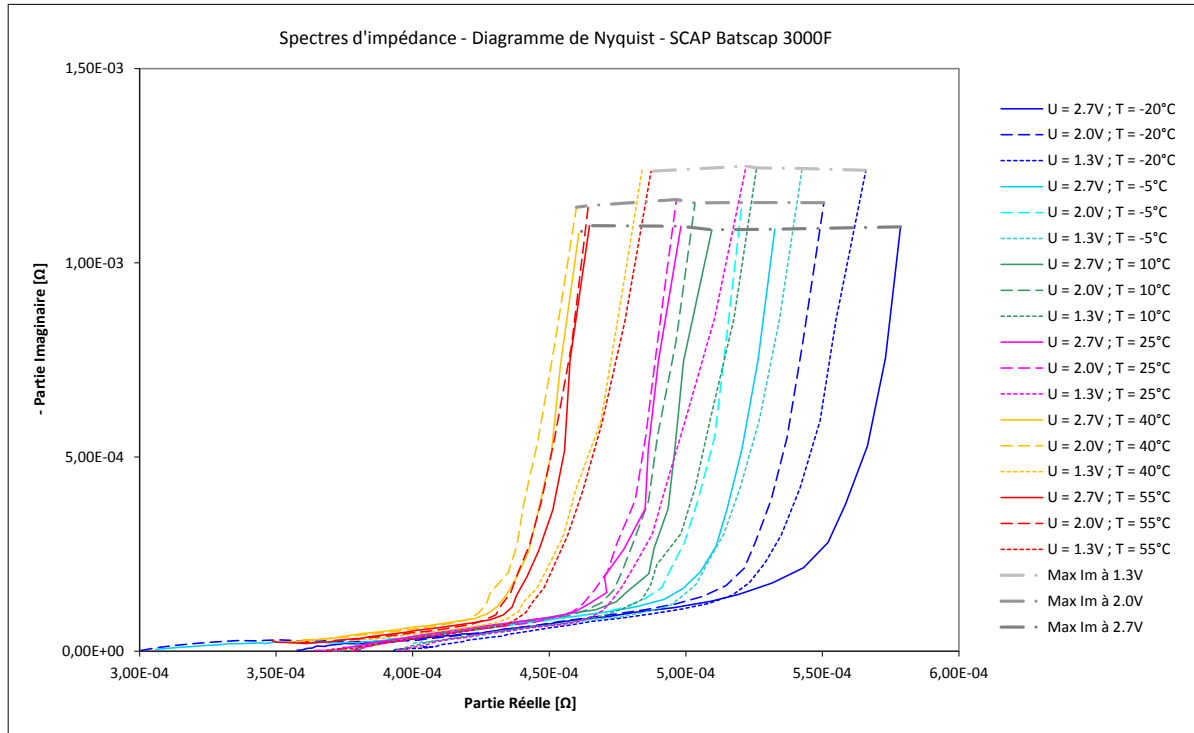


FIGURE VII-21 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST – SCAP BATSCAP 3000F A PLUSIEURS TEMPERATURES ET TENSIONS

Supercondensateur Maxwell 1200F :

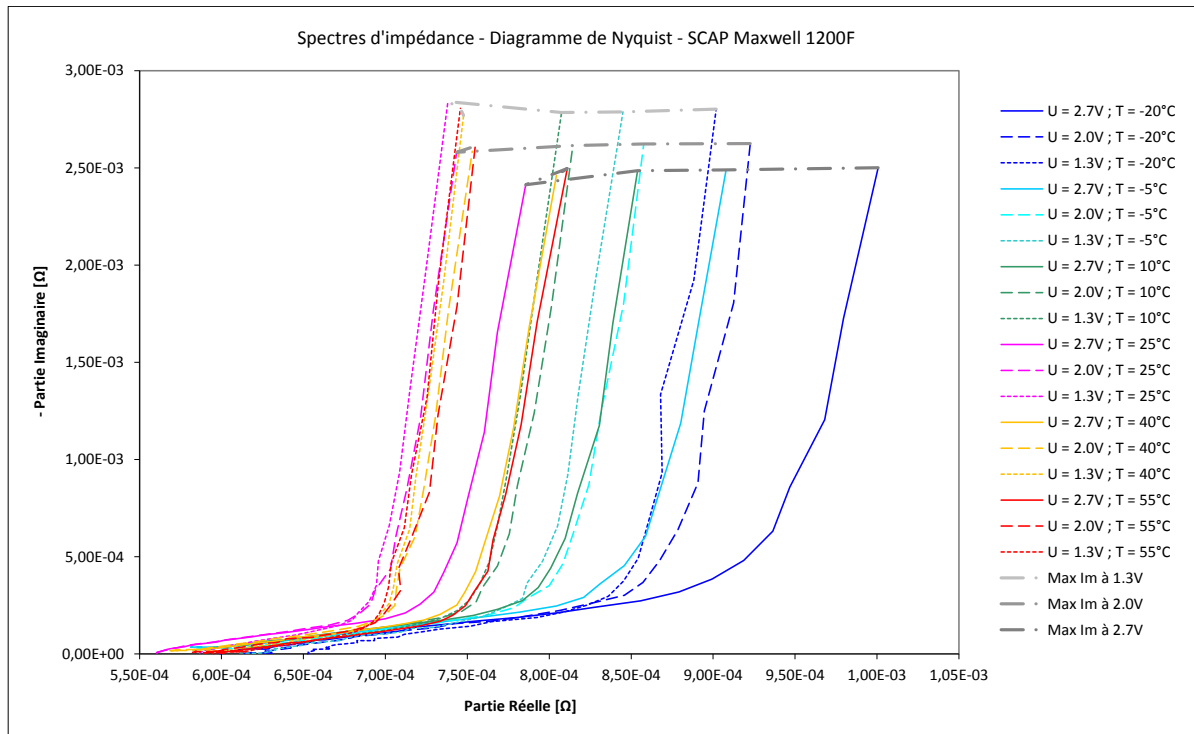


FIGURE VII-22 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST – SCAP MAXWELL 1200F A PLUSIEURS TEMPERATURES ET TENSIONS

Supercondensateur Batscap 1200F :

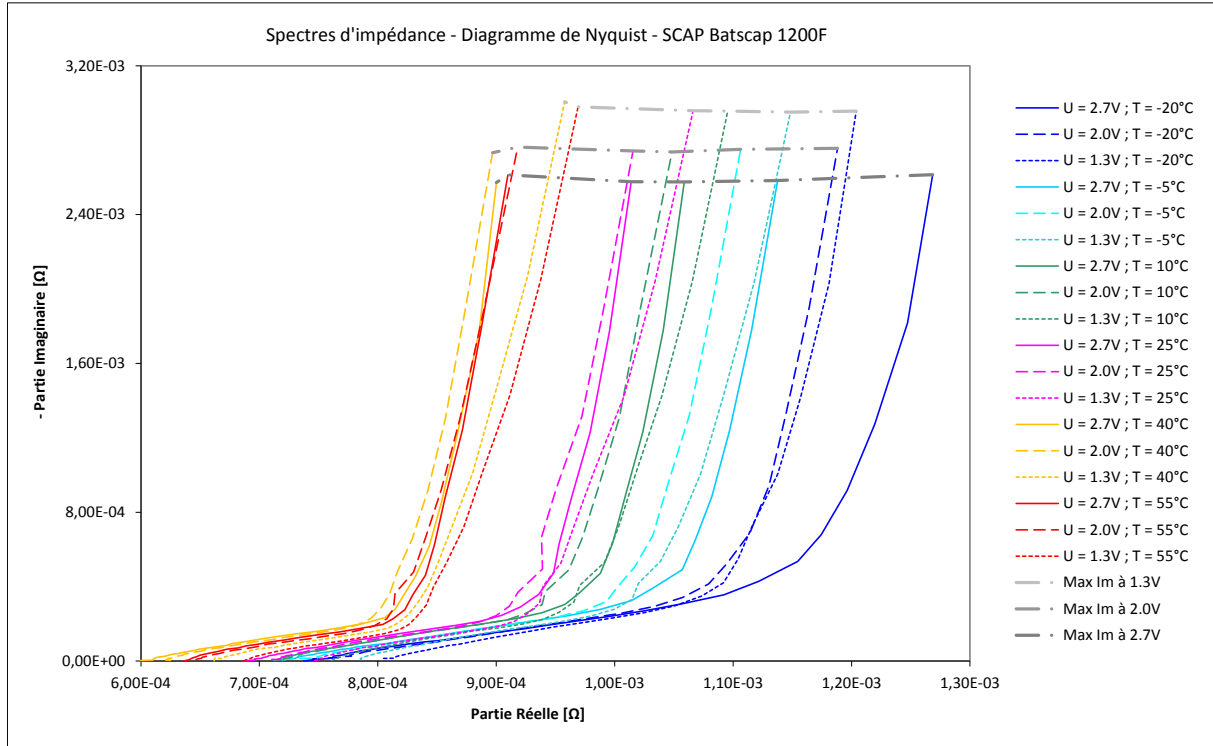


FIGURE VII-23 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST – SCAP BATSCAP 1200F A PLUSIEURS TEMPERATURES ET TENSIONS

Supercondensateur Maxwell 650F :

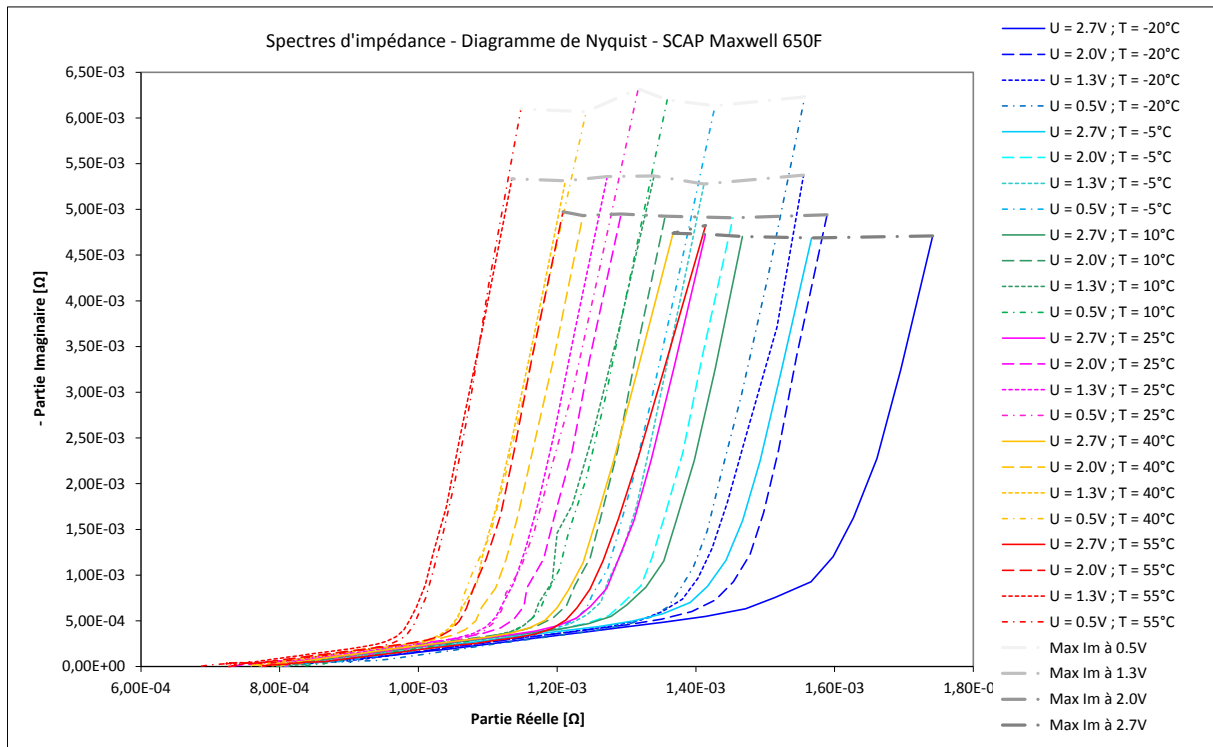


FIGURE VII-24 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST – SCAP MAXWELL 650F A PLUSIEURS TEMPERATURES ET TENSIONS

Supercondensateur Batscap 650F :

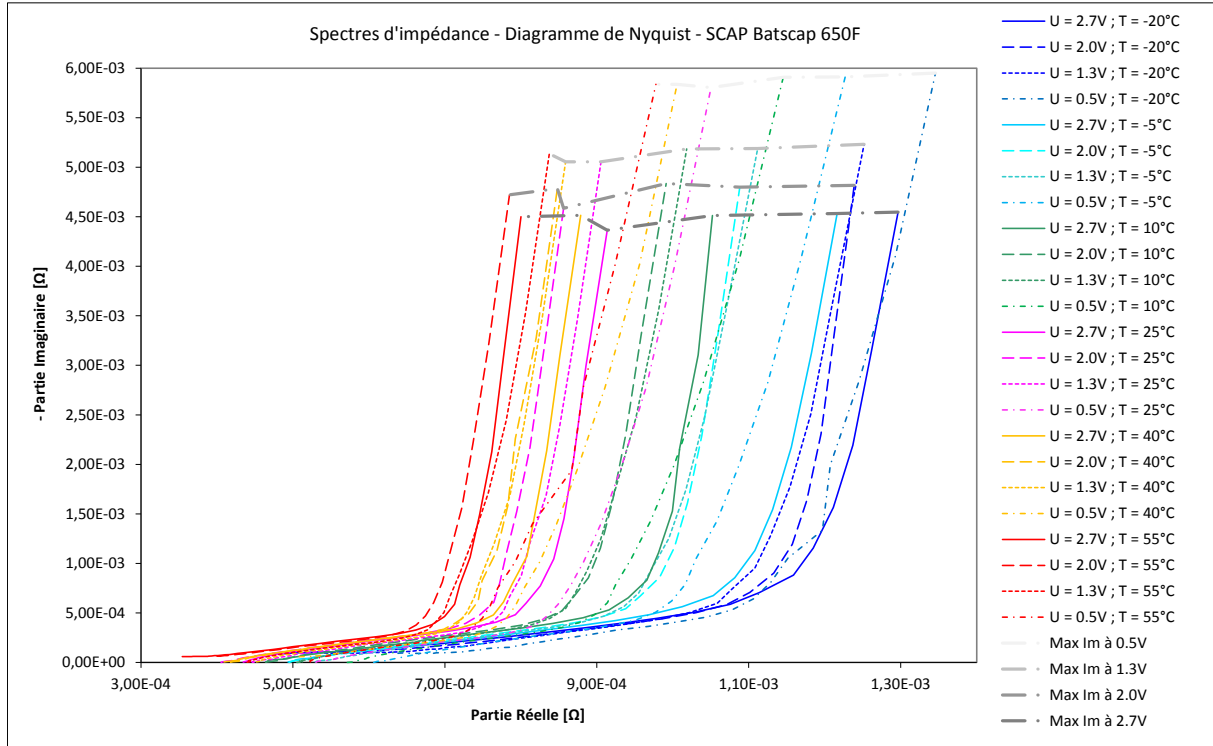


FIGURE VII-25 : SPECTRES D'IMPEDANCE DANS LE PLAN DE NYQUIST – SCAP MAXWELL 650F A PLUSIEURS TEMPERATURES ET TENSIONS

5.1.2.2 PARAMETRES DU MODELE DYNAMIQUE POUR LES SUPERCONDENSATEURS

Supercondensateur Maxwell 3000F :

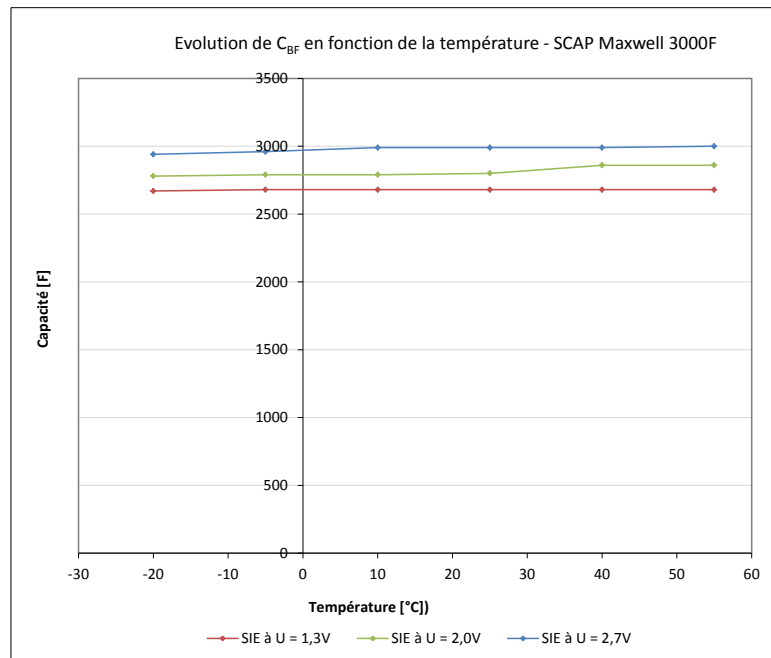


FIGURE VII-26 : EVOLUTION DE LA CAPACITE C_{BF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP M3000F

L'évolution de R_{BF} et R_{HF} pour le supercondensateur Maxwell 3000F est donnée en Figure III-28.

Supercondensateur Batscap 3000F :

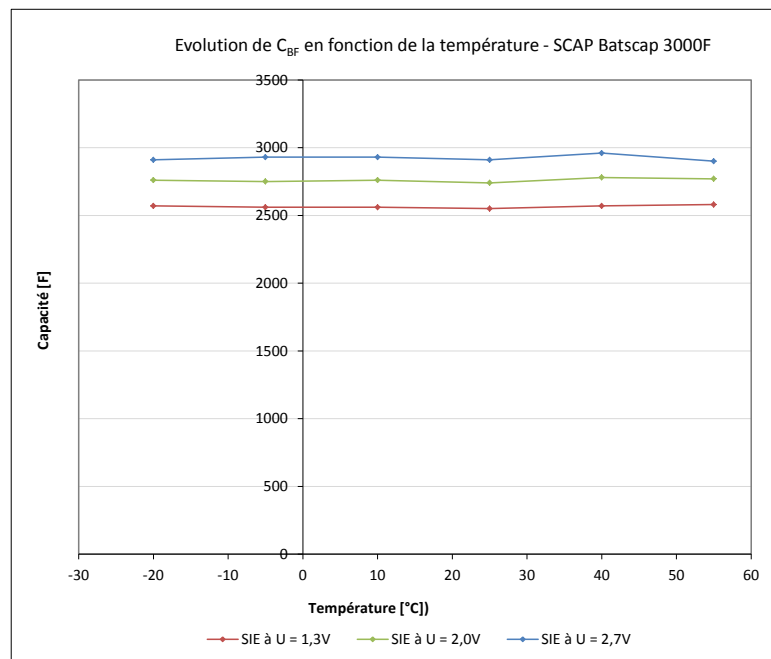


FIGURE VII-27 : EVOLUTION DE LA CAPACITE C_{BF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP B3000F

L'évolution de R_{BF} et R_{HF} pour le supercondensateur Batscap 3000F est donnée en Figure III-29.

Supercondensateur Maxwell 1200F :

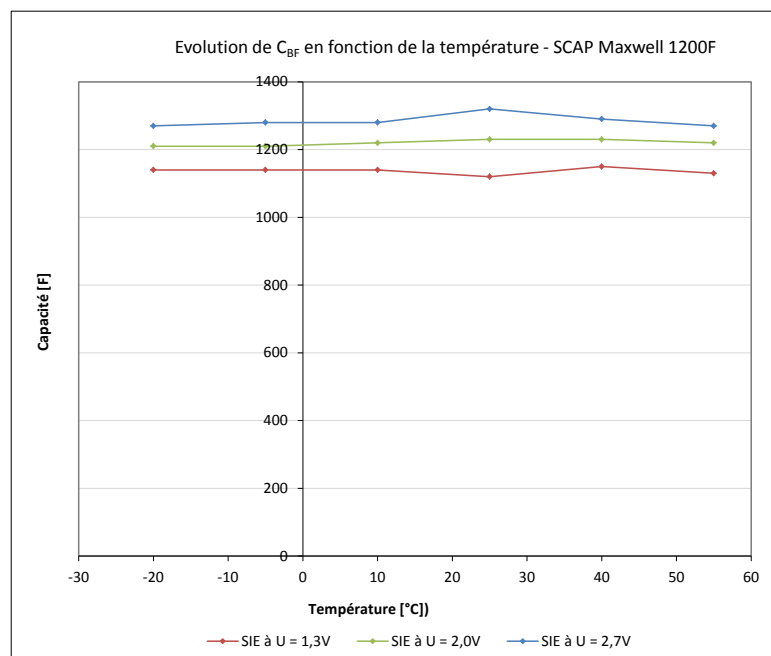


FIGURE VII-28 : EVOLUTION DE LA CAPACITE C_{BF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP M1200F

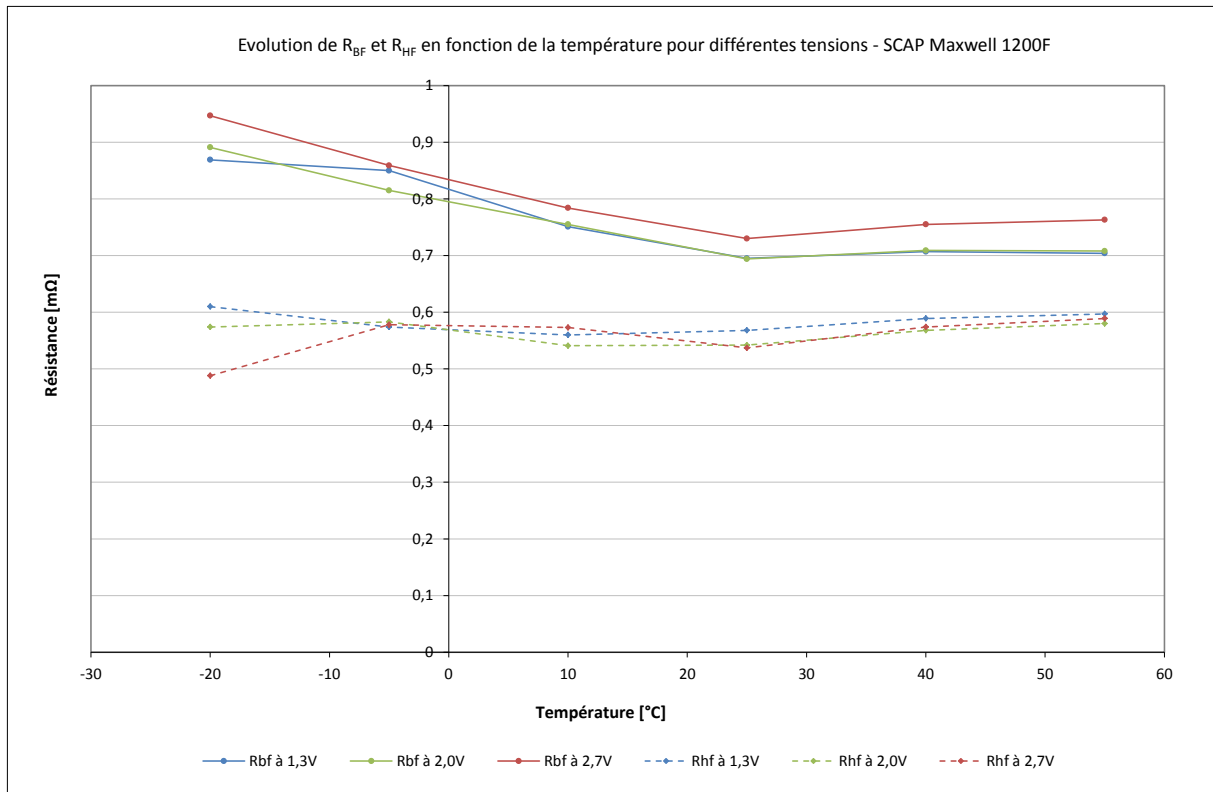


FIGURE VII-29 : EVOLUTION DES RESISTANCES R_{BF} ET R_{HF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP M1200F

Supercondensateur Batscap1200F :

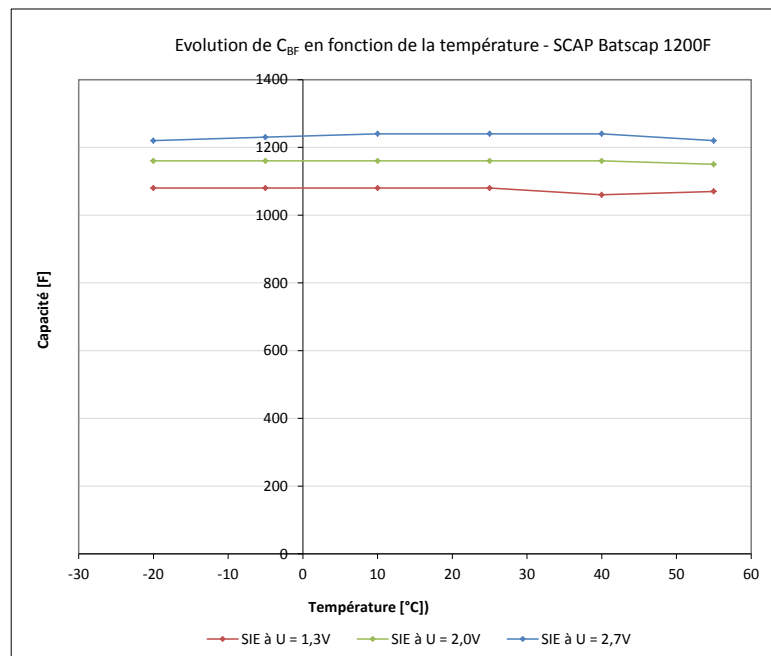


FIGURE VII-30 : EVOLUTION DE LA CAPACITE C_{BF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP B1200F

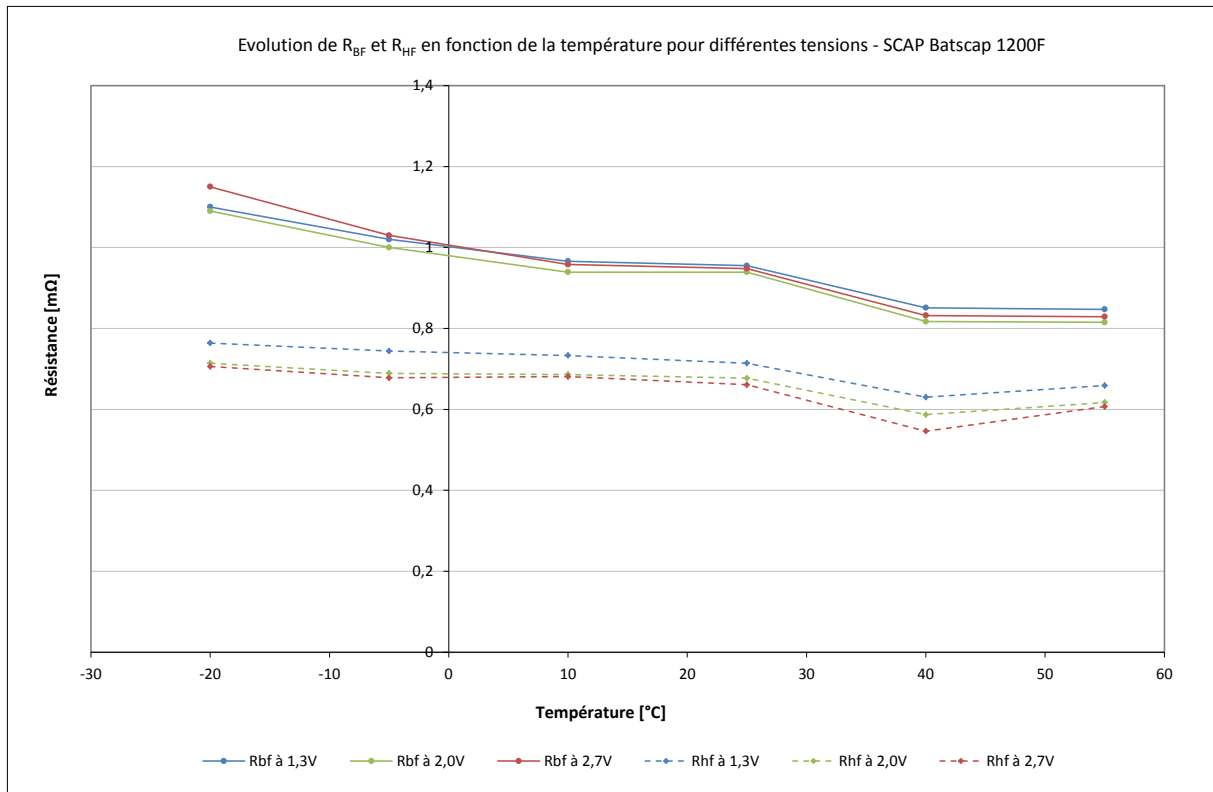


FIGURE VII-31 : EVOLUTION DES RESISTANCES R_{BF} ET R_{HF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP B1200F

Supercondensateur Maxwell 650F :

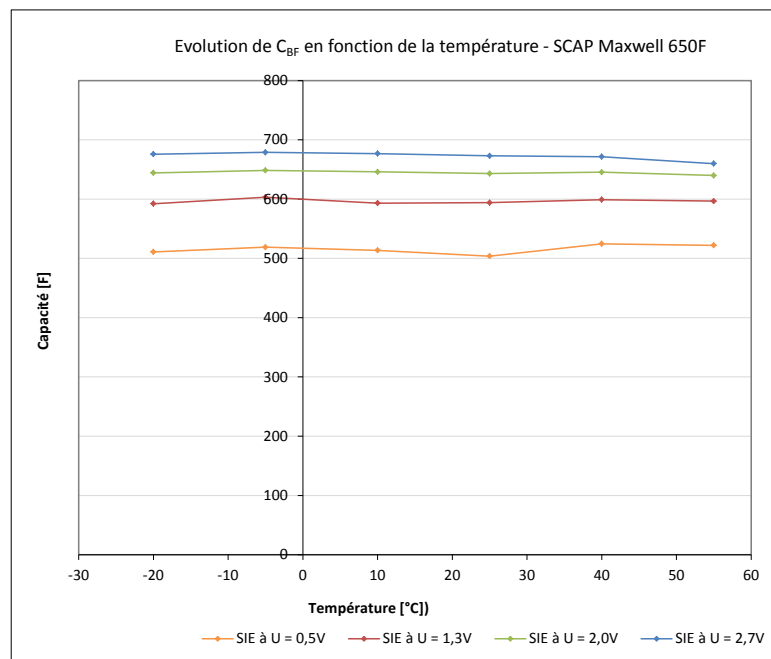


FIGURE VII-32 : EVOLUTION DE LA CAPACITE C_{BF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP M650F

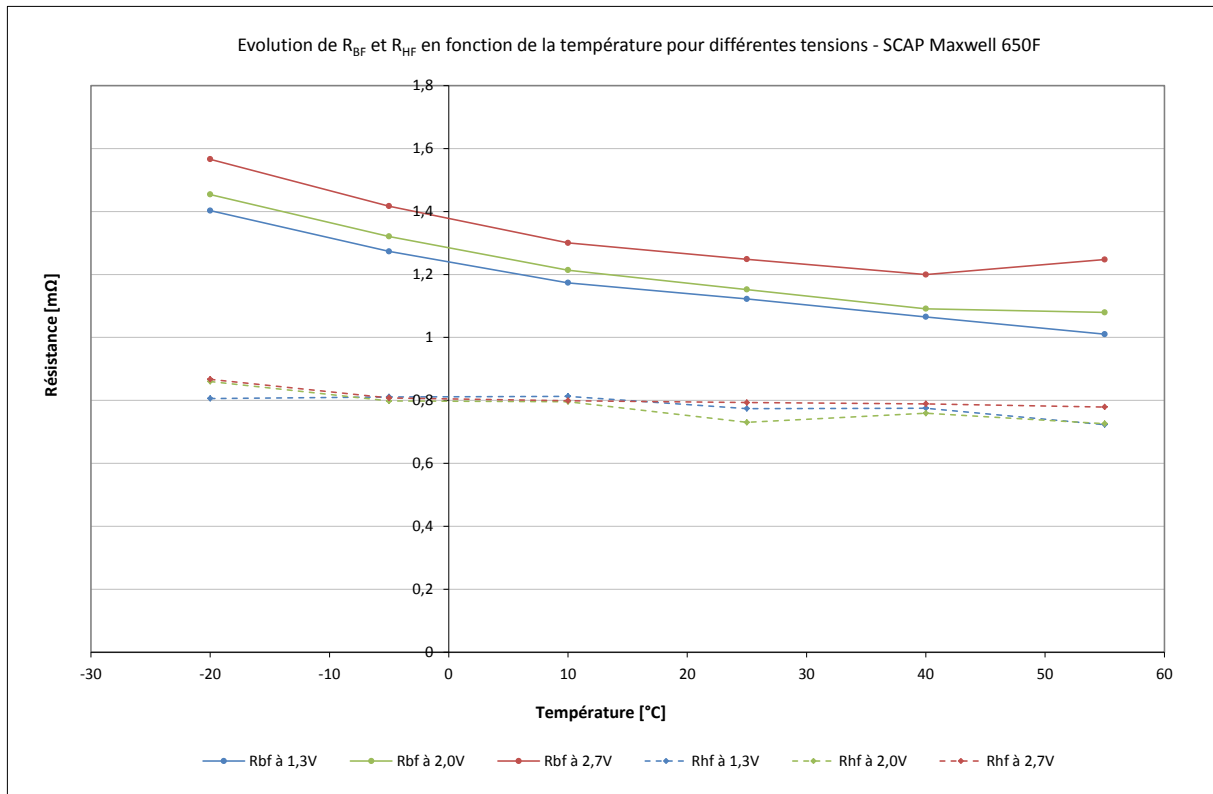


FIGURE VII-33 : EVOLUTION DES RESISTANCES R_{BF} ET R_{HF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP M650F

Supercondensateur Batscap 650F :

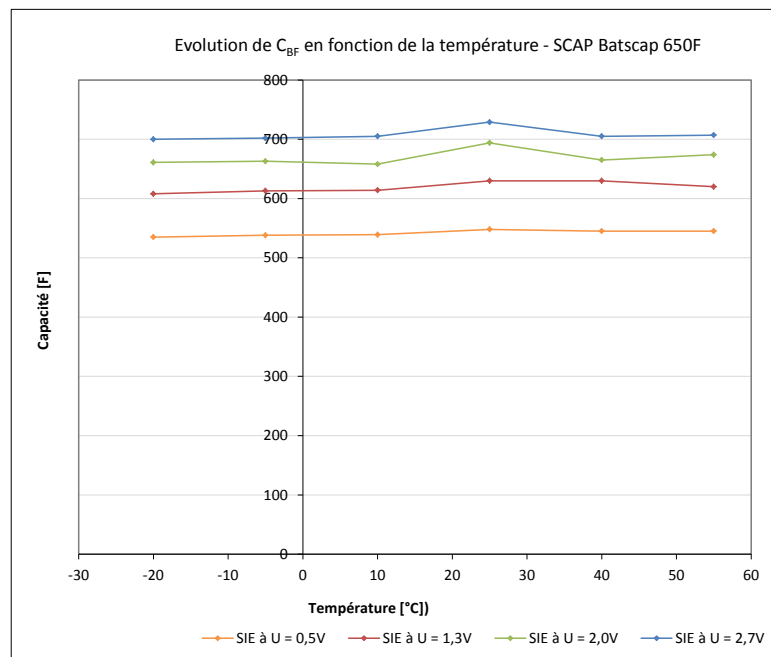


FIGURE VII-34 : EVOLUTION DE LA CAPACITE C_{BF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP B650F

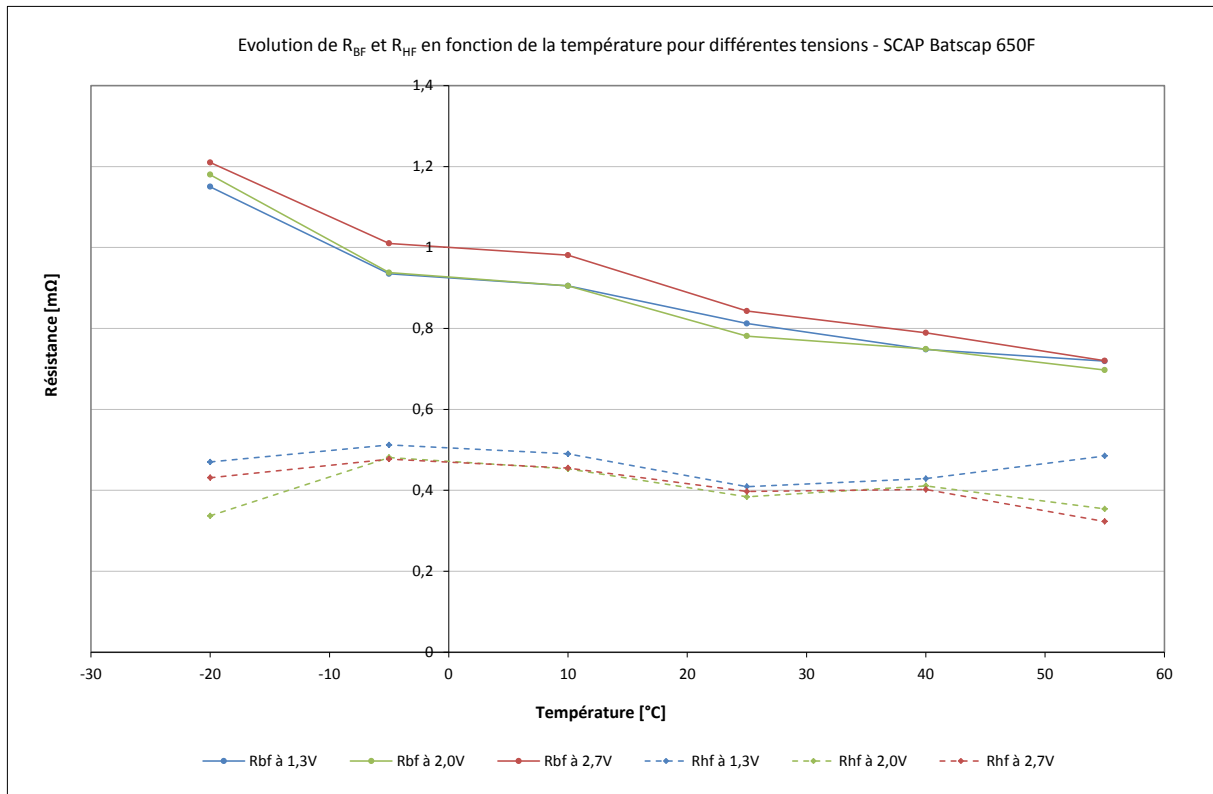


FIGURE VII-35 : EVOLUTION DES RESISTANCES R_{BF} ET R_{HF} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA TENSION – SCAP B650F

5.2 RESULTATS DE SIMULATION

Simulation des modèles standard et à deux branches R-C et comparaison avec les résultats expérimentaux lors d'une décharge à courant constant à 25°C :

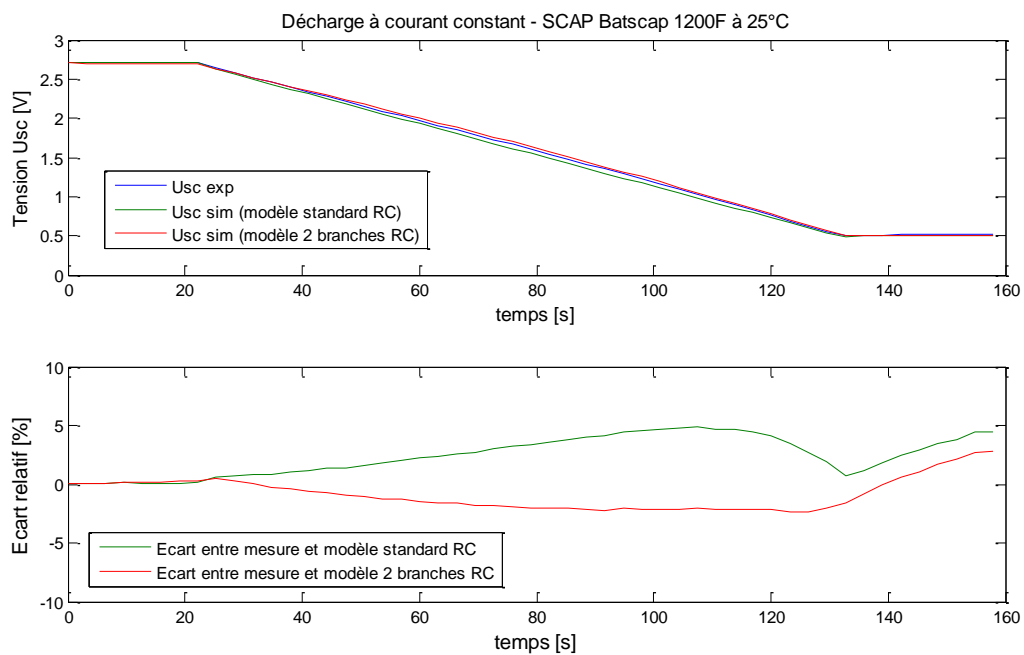


FIGURE VII-36 : COMPARAISON ENTRE L'EXPERIMENTATION ET LA SIMULATION DES MODELES STANDARD ET A 2 BRANCHES RC – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP BATSCAP 1200F A 25°C

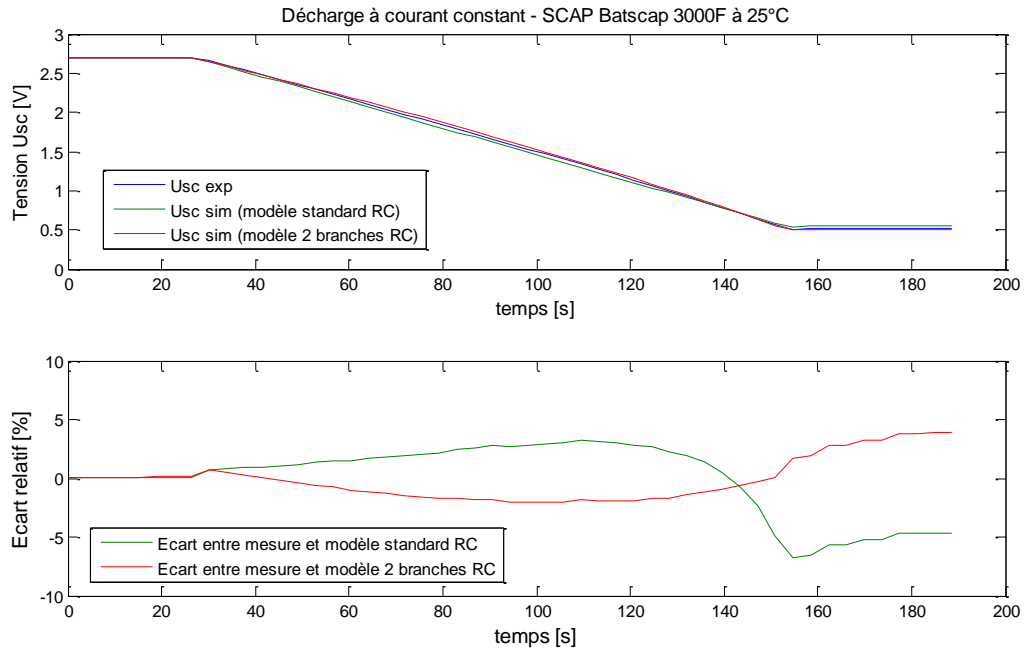


FIGURE VII-37 : COMPARAISON ENTRE L'EXPERIMENTATION ET LA SIMULATION DES MODELES STANDARD ET A 2 BRANCHES RC – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP BATSCAP 3000F A 25°C

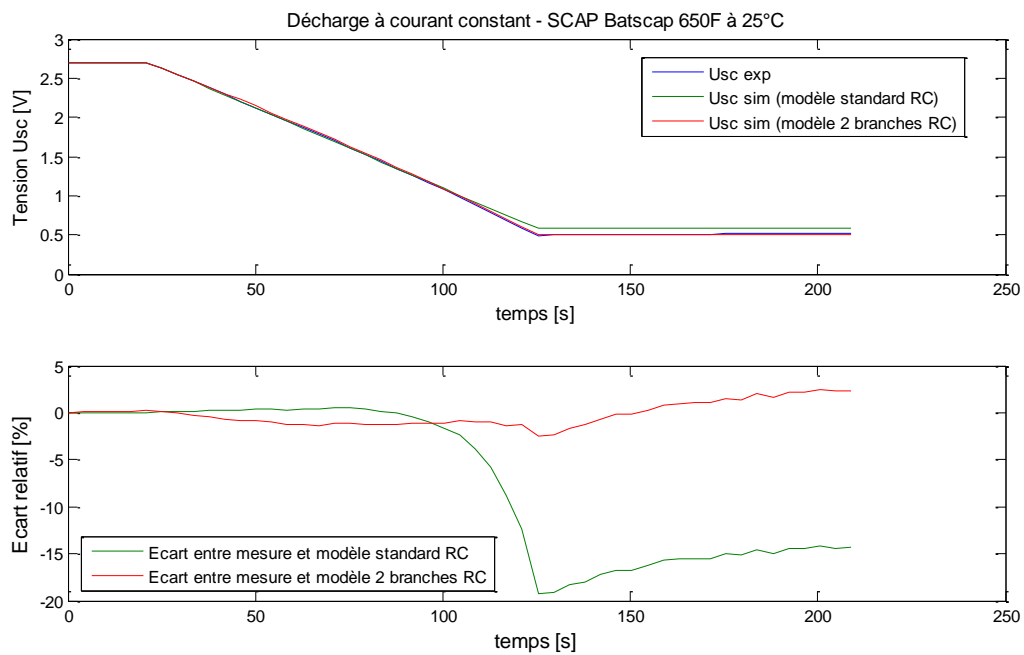
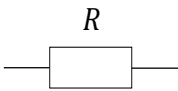
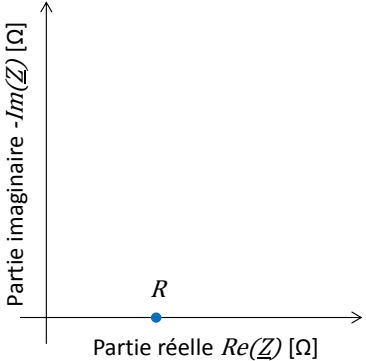
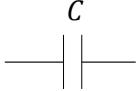
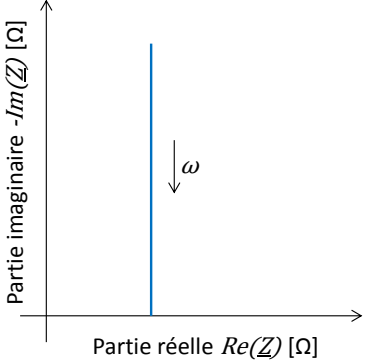
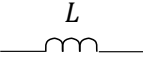
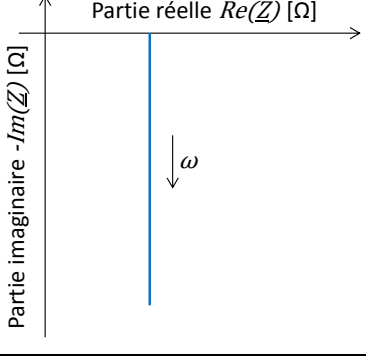

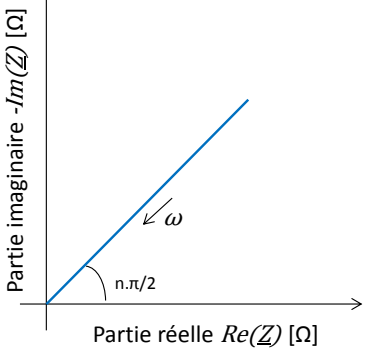
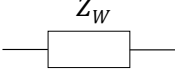
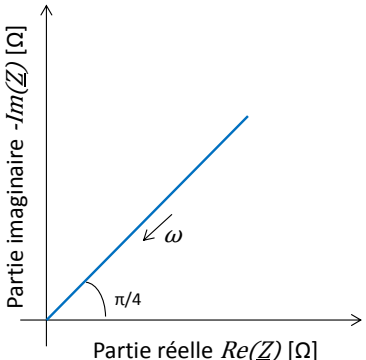
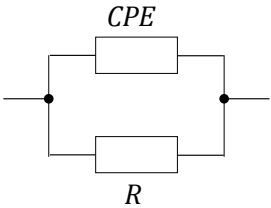
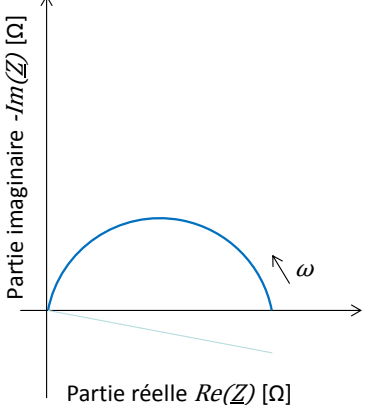


FIGURE VII-38 : COMPARAISON ENTRE L'EXPERIMENTATION ET LA SIMULATION DES MODELES STANDARD ET A 2 BRANCHES RC – DECHARGE A COURANT CONSTANT – SCAP BATCAP 650F A 25°C

6 ANNEXE 6 : REPRESENTATION DANS LE PLAN DE NYQUIST D'IMPEDANCES COMPLEXES DE COMPOSANTS DE CIRCUITS ELECTRIQUES

| Symbole | Fonction de transfert | Diagramme de Nyquist |
|---|---|--|
|  <p style="text-align: center;">R</p> | $Z_R(p) = R$ <p>R : résistance [Ω]</p> |  |
|  <p style="text-align: center;">C</p> | $Z_c(p) = \frac{1}{C \cdot p}$ <p>C : capacité [F]</p> |  |
|  <p style="text-align: center;">L</p> | $Z_L(p) = L \cdot p$ <p>L : inductance [H]</p> |  |
|  <p style="text-align: center;">CPE</p> | $Z_{CPE}(p) = \frac{1}{Q \cdot p^\gamma}$ <p>Q : coefficient multiplicateur [$\Omega^{-(1-\gamma)}, F^\gamma$] γ : ordre de l'impédance $0 \leq \gamma \leq 1$</p> |  |

| Symbole | Fonction de transfert | Diagramme de Nyquist |
|---|--|---|
|  | $Z_W(\omega) = \frac{\sigma(1-j)}{\omega^{1/2}}$ <p>σ : paramètre dépendant des phénomènes électrochimiques [$\Omega \cdot s^{-1/2}$] (Cf. équation VII-5)</p> |  |
|  | $Z(p) = \frac{R}{1 + R \cdot Q \cdot p^\gamma}$ <p>R : résistance [Ω] Q : coefficient [$\Omega^{-(1-\gamma)} \cdot F^\gamma$] $\gamma \in [0 ; 1]$</p> |  |

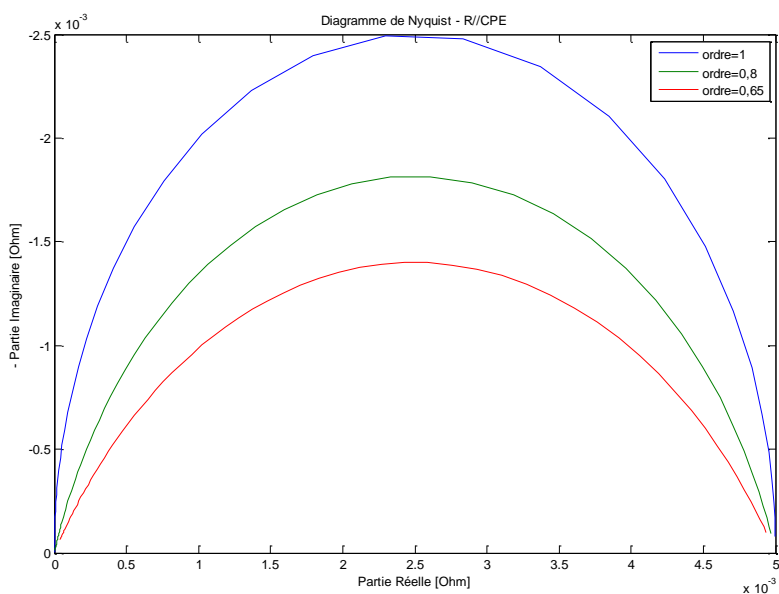


FIGURE VII-39 : REPRESENTATION DE L'IMPEDANCE D'UN CIRCUIT R//CPE (D'ORDRES 1, 0.8 ET 0.65) DANS LE PLAN DE NYQUIST

7 ANNEXE 7 : REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE

La REM est une version macroscopique du Graphe Informationnel Causal (GIC). Elle s'appuie donc sur des principes communs au GIC et offre une vision plus globale en ce qu'elle propose une approche systémique. La REM est un outil qui permet de décrire de manière synthétique et homogène un système multi-physique, autrement dit un système de conversion complexe dont les constituants sont de domaine, de nature et de propriétés différents. La notion centrale est le transfert de l'énergie [78].

Cette représentation est basée sur une analyse fonctionnelle et non structurelle, qui met en évidence les interactions entre les éléments du système et facilite leur association. La REM est une représentation, c'est-à-dire une organisation d'une modélisation donnée, qui décrit de manière graphique simple un système multi-physique afin de lui donner une certaine lisibilité. Les éléments du système et leurs interactions sont représentés respectivement par des pictogrammes et des flèches. Cette méthodologie est basée sur le principe d'action/réaction, qui se définit comme suit [78] : toute action d'un environnement sur un système induit une réaction du système sur l'environnement, et réciproquement. A chaque élément du système sont attribués deux couples de variables d'action/réaction, un en amont et un en aval de l'élément. Une variable d'action est imposée à l'élément par l'environnement et une variable de réaction est imposée par l'élément à l'environnement. Le produit de la variable d'action par la variable de réaction est égal à une puissance instantanée. Enfin, la Représentation Energétique Macroscopique est basée sur le strict respect du principe de causalité des systèmes physiques. La causalité naturelle pour les systèmes physiques est la causalité intégrale induite par l'accumulation d'énergie (notion de variable d'état).

7.1 LES ELEMENTS DE LA REM

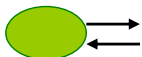
Les éléments de base de la Représentation Energétique Macroscopique, d'après Bousquayrol [78] et Boulon [47], sont :

- les sources d'énergie
- les éléments d'accumulation
- les éléments de conversion
- les éléments de couplage

Source d'énergie

Une source d'énergie est considérée comme un environnement imposant des variables d'état sur le système. Une source d'énergie peut être génératrice ou réceptrice.

Représentation :

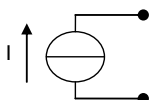


Les variables d'action et de réaction peuvent être scalaires ou vectorielles pour simplifier la représentation.

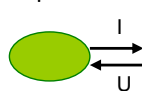
Exemples de sources d'énergie

- Source de courant :

Schéma structurel :

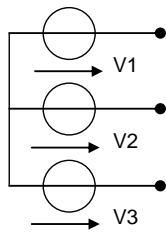


Représentation (variables scalaires) :

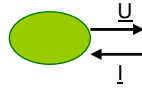


- Source de tension triphasée :

Schéma structurel :



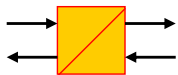
Représentation (variables vectorielles) :



Accumulateurs d'énergie

Un accumulateur ou élément d'accumulation est lié généralement à deux éléments, il possède alors deux couples de variables : un couple action/réaction en amont et un couple action/réaction en aval. Il s'agit d'une conversion non instantanée (relation dépendante du temps), qui tient compte de la fonction de stockage temporaire d'énergie (effet tampon). Un élément d'accumulation admet une causalité interne ou intrinsèque, et impose la causalité aux éléments non accumulatifs.

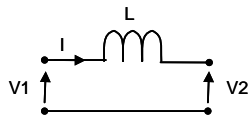
Représentation :



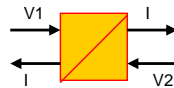
Exemples d'accumulateur d'énergie

- Bobine (inductance) :

Schéma :

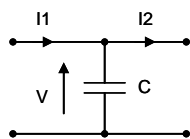


Représentation :

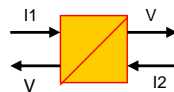


- Condensateur :

Schéma :



Représentation :



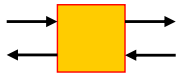
Convertisseur d'énergie

Un convertisseur relie deux sources (chacune des sources étant définie par un couple de variables entrée/sortie) en assurant une modulation d'une des variables sans prélèvement de puissance. Il s'agit d'une conversion instantanée sans accumulation de l'énergie. La conversion étant réversible (au sens causal), un élément de conversion admet une causalité externe ou extrinsèque, imposée par celle des éléments qui lui sont connectés. Une variable de réglage peut être associée au convertisseur pour régler le rapport de conversion.

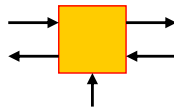
On distingue la conversion à l'intérieur d'un domaine (électrique/électrique, mécanique/mécanique, ...) et la conversion d'un domaine vers un autre domaine (conversions électromécanique, électrochimique, ...).

Représentation :

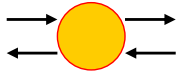
Conversion à l'intérieur d'un même domaine :



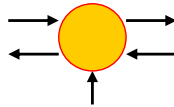
(avec variable de réglage)



Conversion d'un domaine vers un autre :



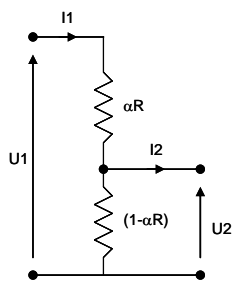
(avec variable de réglage)



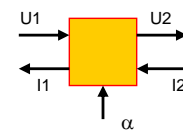
Exemples de convertisseur d'énergie

- Montage potentiométrique :

Schéma structurel :

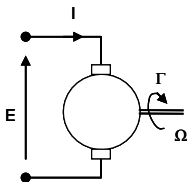


Représentation : (α : variable de réglage)

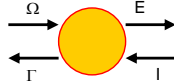


- Conversion électromécanique au sein d'une machine à courant continu à aimants permanents :

Schéma structurel :



Représentation :

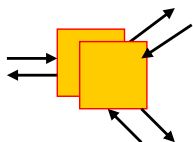


Couplages

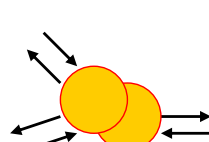
Les éléments de couplage représentent la distribution d'un flux de puissance. Lorsque le flux est distribué, on parle de couplage amont ; lorsqu'il est collecté, on parle de couplage aval. Comme pour les éléments de conversion, on distingue les couplages inter-domaines et multi-domaines.

Représentation :

Couplage inter-domaine (amont) :

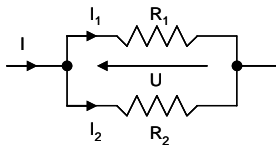


Couplage multi-domaine (aval) :

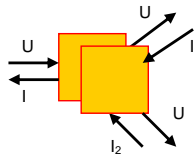


Exemple de couplage (diviseur de courant)

Schéma structurel :



Représentation :



7.2 LES REGLES D'ASSOCIATION

Après avoir identifié les différents éléments constitutifs d'un système (sources, accumulateurs et convertisseurs), on étudie l'interconnexion entre ces divers éléments, en fonction de leurs caractéristiques. L'association des éléments est facilitée lorsque les règles énoncées ci-dessous sont respectées [78].

Les règles d'association sont :

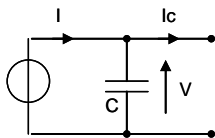
- l'association directe
- la concaténation
- la permutation
- la fusion

Association directe

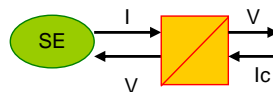
Cette association est la plus simple et la plus évidente entre deux éléments dont les variables correspondent : la sortie d'action du premier est l'entrée d'action du second et la sortie de réaction du second est l'entrée de réaction du premier.

Exemple : une source de courant associée à un condensateur

Schéma structurel :



Représentation :

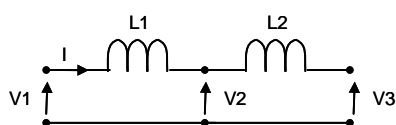


Concaténation

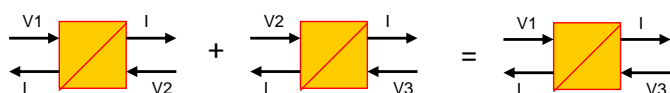
La règle de concaténation s'exprime comme suit : l'association de deux éléments d'accumulation peut être réalisée par concaténation pour résoudre un conflit de variable d'état. La concaténation met en évidence la propriété globale du système, et masque les propriétés locales des éléments.

Exemple : association de deux inductances

Schéma structurel :



Représentation :



La seule variable d'état est le courant commun à L1 et L2.

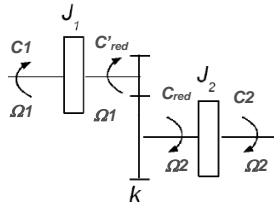
L'association des deux éléments d'accumulation peut être représentée par un seul élément d'accumulation, issu de la concaténation des deux premiers ($L = L1 + L2$).

Permutation

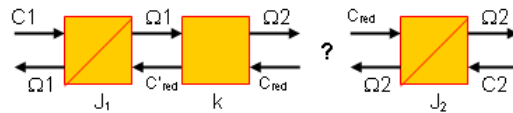
La règle de permutation s'exprime comme suit : un élément d'accumulation et un élément de conversion peuvent être permutés à condition qu'ils produisent les mêmes effets sous les mêmes sollicitations.

Exemple : association de deux arbres inertiels via un réducteur

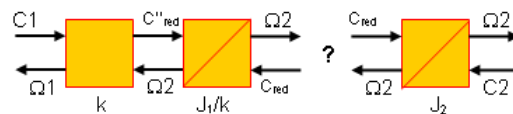
Schéma structurel :



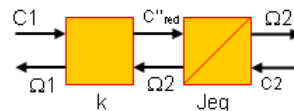
Représentation :



La permutation permet de passer outre la structure et de raisonner fonctionnellement :



En appliquant la règle de concaténation, on a :



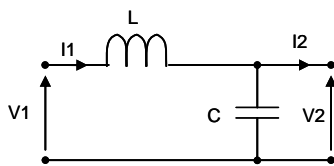
Avec $J_{eq} = J_1/k^2 + J_2$

Fusion

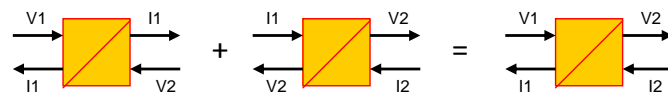
La règle de fusion consiste à fusionner deux éléments, par exemple deux éléments d'accumulation successifs qui ne peuvent être concaténés (une inductance et un condensateur) ou un élément de conversion avec un élément de couplage. Cette règle rend l'analyse du système très fonctionnelle, et fait disparaître sa structure.

Exemple : association d'une inductance et d'un condensateur

Schéma structurel :



Représentation :



L'association des deux éléments d'accumulation peut être représentée par un seul élément d'accumulation, issu de la fusion des deux éléments.

7.3 STRUCTURE DE COMMANDE

La Structure Maximale de Commande (SMC) est obtenue par inversion de la chaîne principale. La méthodologie REM permet de structurer la synthèse de la commande du système et d'introduire une gestion optimisée de l'énergie [78].

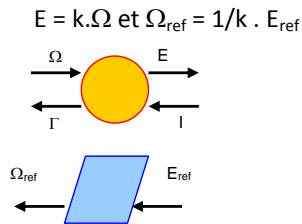
Le principe d'inversion est appliqué aux deux types d'élément qui assurent la modification de l'énergie. On distingue :

- l'inversion directe pour les éléments de conversion
- l'inversion indirecte pour les éléments d'accumulation (inversion par un asservissement)

Commande d'un élément de conversion sans variable de réglage

La partie commande d'un élément de conversion est obtenue par inversion directe de la REM. Pour imposer la sortie du bloc de commande, on joue sur l'entrée d'action.

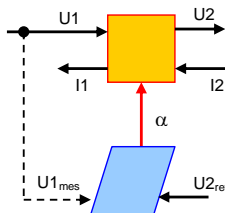
Exemple : Conversion électromécanique d'une MCC à aimants permanents



Commande d'un élément de conversion avec variable de réglage

La partie commande d'un convertisseur est obtenue par inversion directe de l'élément. Pour imposer la sortie, on peut jouer soit sur l'entrée d'action, soit sur l'entrée de réglage. Généralement, l'entrée de réglage est choisie et par ce biais, la commande agit sur le système. Dans ce cas, l'entrée d'action devient une entrée de perturbation qui doit être mesurée. L'entrée de perturbation est représentée par un trait en pointillés.

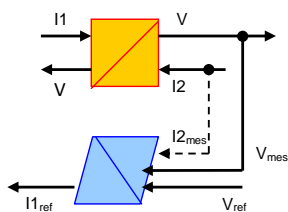
Exemple : Montage potentiométrique



Commande d'un élément d'accumulation

Un accumulateur admettant une causalité intrinsèque, il ne peut être physiquement inversé. Son inversion est donc indirectement obtenue par un asservissement. Cet asservissement définit la variable de réglage à imposer au système tout en minimisant l'écart entre la sortie et sa référence. De plus, l'entrée de réaction (aval) est une entrée de perturbation qui doit être également mesurée (liaison en pointillés). La nature du contrôleur est à déterminer par le concepteur.

Exemple : Condensateur



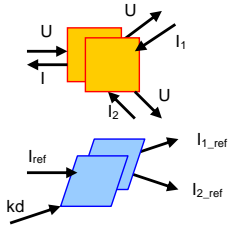
Commande d'un élément de couplage

La partie commande d'un élément de couplage est obtenue par inversion directe de l'élément. Un élément de couplage peut receler un degré de liberté caché qui est un coefficient de répartition.

Exemple : Diviseur de courant

Dans ce cas, les courants I_{1_ref} et I_{2_ref} sont déterminés en fonction de la référence I_{ref} et du coefficient de répartition kd .

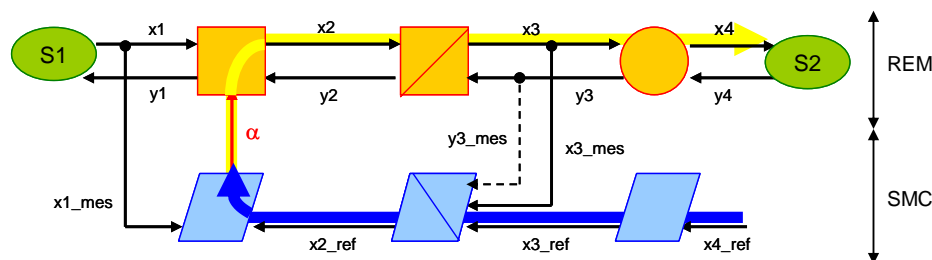
(Par exemple, $I_{1_ref} = kd \cdot I_{ref}$ et $I_{2_ref} = (1-kd) \cdot I_{ref}$ si $kd \in [0 ; 1]$)



Chaîne de réglage

Avant d'inverser la REM d'un système, la première étape consiste à identifier la chaîne de réglage [47]. La REM fait apparaître des variables de réglages. Une entrée de réglage représente un degré de liberté utilisable par la commande. Chaque variable de réglage autorise le contrôle d'une variable énergétique. La chaîne de réglage est la chaîne d'action qui relie la variable de réglage à la variable à contrôler. Idéalement, un système doit comporter autant de variables de réglage que de variables à contrôler.

Sur l'exemple ci-dessous, la chaîne de réglage est matérialisée en jaune.



Chaîne de contrôle

La chaîne de contrôle est obtenue par inversion directe des éléments relatifs à la chaîne de réglage. Elle est représentée en bleu sur l'exemple précédent.

Structure Maximale de Commande et Structure Pratique de Commande

La structure de commande déduite de l'inversion de la chaîne principale (REM) est appelée Structure Maximale de Commande (SMC) car elle demande un maximum de capteurs et un maximum d'opérations.

Une Structure Pratique de Commande (SPC) peut être déduite de la SMC par simplification. La SPC prend en compte le fait que certaines commandes ne peuvent être mises en œuvre pour des raisons technologiques ou économiques. Ainsi une grandeur peut être estimée lorsque sa mesure n'est pas envisageable car trop onéreuse ou technologiquement impossible (par exemple, la mesure de la force électromotrice d'une machine).

GLOSSAIRE

| | |
|-------------|--|
| AC | Alternative Current |
| ACEPU | Alternative Current External Power Unit |
| APU | Auxiliary Power Unit |
| ATRU | Auto Transformer Rectifier Unit |
| BCRU | Battery Charger Rectifier Unit |
| BF | Basses Fréquences |
| BMS | Battery Management System |
| CPE | Constant-Phase Element |
| CSM/G | Constant Speed Motor/Generator |
| DC | Direct Current |
| DCEPU | Direct Current External Power Unit |
| DOD | Depth Of Discharge (Profondeur de décharge) |
| DGA | Direction Générale de l'Armement |
| ESR | Equivalent Serial Resistance (résistance série équivalente) |
| ESS | Energy Storage System (=SSE) |
| EST | Equipement Sous Test |
| EXT | Sources extérieures de type Prise de parc |
| Fem | Force électromotrice |
| FEMTO-ST | Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique Optique – Sciences et Techniques |
| GIC | Graphe Informationnel Causal |
| HF | Hautes Fréquences |
| IDG | Integrated Drive Generator |
| IHM | Interface Homme-Machine |
| NBPT | No Break Power Transfer |
| OCV | Open-Circuit Voltage (tension à vide) |
| PAC | Pile A Combustible |
| RAT | Ram Air Turbine |
| REM | Représentation Energétique Macroscopique |
| S/G | Starter/Generator |
| SIE | Spectrométrie d'Impédance Electrochimique |
| SMES | Superconducting Magnetic Energy Storage (système de stockage magnétique par supraconducteurs) |
| SOC | State Of Charge (Etat de charge) |
| SLIT | Système Linéaire Invariant dans le Temps |
| SMC | Structure Maximale de Commande |
| SSE | Système de Stockage de l'Energie |
| TR (ou TRU) | Transformer Rectifier (ou Transformer Rectifier Unit) |
| VEH | Véhicule Electrique et Hybride |
| VFG | Variable Frequency Generator |

NOMENCLATURE

Chapitre I

| <i>Symbole ou Variable</i> | <i>Désignation / signification</i> | <i>Unité</i> |
|----------------------------|---|------------------------|
| α | Autonomie d'un SSE | [s] |
| ϵ_0 | Permittivité du vide | [F.m ⁻¹] |
| ϵ_r | Permittivité relative | |
| ϵ_M | Densité énergétique massique d'un volant d'inertie | [J.kg ⁻¹] |
| ϵ_V | Densité énergétique volumique d'un volant d'inertie | [J.m ⁻³] |
| v_{ext} | Vitesse périphérique du cylindre mince d'un volant d'inertie | [m.s ⁻¹] |
| ρ_{VI} | Masse volumique du volant d'inertie | [kg.m ⁻³] |
| Ω | Vitesse de rotation du volant d'inertie | [rad.s ⁻¹] |
| Ω_{max} | Vitesse maximale de rotation du volant d'inertie | [rad.s ⁻¹] |
| C_{acc} | Capacité pratique d'un accumulateur | [C] ou [Ah] |
| $C_{acc,th}$ | Capacité théorique d'un accumulateur | [C] ou [Ah] |
| C_- | Capacité théorique maximale de l'électrode négative d'un accumulateur | [C] ou [Ah] |
| C_+ | Capacité théorique maximale de l'électrode positive d'un accumulateur | [C] ou [Ah] |
| C_c | Capacité d'un condensateur | [F] |
| C_h | Régime de charge ou de décharge en h heures d'un accumulateur | [A] |
| C_n | Capacité nominale d'un accumulateur | [Ah] |
| C_u | Capacité utile d'un accumulateur (positive en décharge, négative en charge) | [Ah] |
| C_{sc} | Capacité d'un supercondensateur | [F] |
| DOD | Profondeur de décharge d'un accumulateur | [%] |
| e | Epaisseur de l'isolant diélectrique d'un condensateur | [m] |
| E_0 | Tension à vide d'un accumulateur | [V] |
| E^{0+} | Potentiel standard de l'électrode positive d'un accumulateur | [V] |
| E^{0-} | Potentiel standard de l'électrode négative d'un accumulateur | [V] |
| ESR | Résistance interne d'un supercondensateur | [Ω] |
| I | Intensité | [A] |
| J | Moment d'inertie d'un volant d'inertie | [kg.m ²] |
| L | Inductance d'un SMES | [H] |
| P_d | Puissance disponible dans un SSE | [W] |
| P_{max} | Puissance maximale dans un SSE | [W] |
| P_{moy} | Puissance moyenne dans un SSE | [W] |
| $P_{sc,max}$ | Puissance maximale dans un supercondensateur | [W] |
| Q_c | Charge d'un condensateur | [C] |
| Q_{sc} | Charge d'un supercondensateur | [C] |
| S | Surface en regard des électrodes d'un condensateur plan | [m ²] |
| SOC | Etat de charge de l'accumulateur | [%] |
| SOC_0 | Etat de charge initial de l'accumulateur | [%] |
| t | Temps | [s] |
| t_{dech} | Temps de décharge d'un SSE | [s] |

| <i>Symbole ou Variable</i> | <i>Désignation / signification</i> | <i>Unité</i> |
|----------------------------|---|--------------|
| U | Tension | [V] |
| W_{acc} | Energie stockée dans un accumulateur | [J] |
| W_c | Energie stockée dans un condensateur | [J] |
| W_L | Energie stockée dans un SMES | [J] |
| W_{sc} | Energie stockée dans un supercondensateur | [J] |
| $W_{stockée}$ | Energie stockée dans un SSE | [J] |
| W_{utile} | Energie utile restituée par un SSE | [J] |
| W_{VI} | Energie stockée dans un volant d'inertie | [J] |
| $W_{VI,max}$ | Energie maximale stockée dans un volant d'inertie | [J] |
| $W_{VI,utile}$ | Energie utile restituée par un volant d'inertie | [J] |

Rappel : 1Ws = 1J ; 1Wh = 3600J.

Chapitre II

| <i>Symbole ou Variable</i> | <i>Désignation / signification</i> | <i>Unité</i> |
|----------------------------|---|---|
| γ | Ordre de l'impédance d'un CPE (Constant Phase Element) | |
| γ_{dc} | Ordre de l'impédance du CPE modélisant la double couche | |
| $\Delta V'$ | Chute de tension à l'application du courant de décharge | [V] |
| $\Delta V''$ | Différence de potentiel à l'annulation du courant | [V] |
| σ | Paramètre dépendant des phénomènes électrochimiques | $[\Omega \cdot s^{-1/2}]$ |
| τ_d | Constante de temps du phénomène de diffusion | [s] |
| φ | Phase ou argument de l'impédance complexe \underline{Z} | [rad] |
| ω | Pulsation ($\omega = 2\pi f$) | $[\text{rad} \cdot s^{-1}]$ |
| ω_{c1} | Pulsation critique de l'impédance du circuit R_{tc}/C_{dc} | $[\text{rad} \cdot s^{-1}]$ |
| C_{Cauer} | Capacité dans la structure de Cauer | [F] |
| C_{dc} | Capacité de double couche à l'interface électrolyte/électrode | [F] |
| C_{Foster} | Capacité dans la structure de Foster | [F] |
| C_n | Capacité nominale d'un accumulateur | [Ah] |
| C_R | Capacité restituée par l'accumulateur (décharge à régime nominal) | [Ah] |
| C_S | Capacité stockée dans l'accumulateur lors d'un protocole de charge | [Ah] |
| C_u | Capacité utile d'un accumulateur (positive en décharge, négative en charge) | [Ah] |
| E_0 | Tension à vide d'un accumulateur | [V] |
| $E_0(i-1)$ | Tension à vide avant l'application du créneau de courant | [V] |
| $E_0(i)$ | Tension à vide après stabilisation (période d'équilibre) | [V] |
| E_{th} | Tension à vide d'un accumulateur (potentiel équivalent de Thévenin) | [V] |
| $f_{\theta_{acc}}$ | Fréquence délimitant les comportements inductif et capacitif d'un ACC | [Hz] |
| I_{acc} | Courant dans un accumulateur | [A] |
| $I_{acc_{dech}}$ | Courant de décharge d'un accumulateur | [A] |
| I_{charge} | Courant délivré dans la charge électronique (banc de test) | [A] |
| $I_{charge_{ref}}$ | Consigne de courant pour la charge électronique (banc de test) | [A] |
| I_{EST} | Courant de l'équipement sous test (banc de test) | [A] |
| I_{source} | Courant fourni par la source (banc de test) | [A] |
| $I_{source_{ref}}$ | Consigne de courant pour la source (banc de test) | [A] |
| $Im(\underline{Z})$ | Partie imaginaire de l'impédance complexe \underline{Z} | $[\Omega]$ |
| L_{ft} | Inductance de fuite pour un accumulateur en hautes fréquences | [H] |
| Q | Coefficient multiplicateur d'un CPE (Constant Phase Element) | $[\Omega^{-(1-\gamma)} \cdot F^\gamma]$ |
| Q_{dc} | Coefficient multiplicateur du CPE modélisant la double couche | $[\Omega^{-(1-\gamma_{dc})} \cdot F^{\gamma_{dc}}]$ |
| Q_W | Coefficient multiplicateur pour l'impédance de Warburg | $[\Omega^{-1/2} \cdot F^{1/2}]$ |
| R' | Résistance associée à la chute de tension $\Delta V'$, selon II-9 | $[\Omega]$ |
| R'' | Résistance associée à la différence de potentiel $\Delta V''$, selon II-10 | $[\Omega]$ |
| R_{acc} | Résistance interne (ESR) d'un accumulateur | $[\Omega]$ |
| R_{Cauer} | Résistance dans la structure de Cauer | $[\Omega]$ |
| R_d | Résistance de diffusion | $[\Omega]$ |
| $R_{eq,d}$ | Résistance équivalente, représentative du phénomène de diffusion | $[\Omega]$ |
| R_{Foster} | Résistance dans la structure de Foster | $[\Omega]$ |
| R_Ω | Résistance ohmique (électrodes) | $[\Omega]$ |

| <i>Symbole ou Variable</i> | <i>Désignation / signification</i> | <i>Unité</i> |
|----------------------------|--|--------------|
| R_{tc} | Résistance de transfert de charge | [Ω] |
| $Re(\underline{Z})$ | Partie réelle de l'impédance complexe \underline{Z} | [Ω] |
| SOC | Etat de charge de l'accumulateur | [%] |
| SOC_0 | Etat de charge initial de l'accumulateur | [%] |
| T_{amb} | Température ambiante de la chambre climatique | [°C] |
| T_{EST1} | Température en surface de l'équipement sous test (côté borne positive) | [°C] |
| T_{EST2} | Température en surface de l'équipement sous test (côté borne négative) | [°C] |
| U_{acc} | Tension aux bornes d'un accumulateur | [V] |
| $U_{acc,max}$ | Tension maximale aux bornes d'un accumulateur | [V] |
| $U_{acc,min}$ | Tension minimale aux bornes d'un accumulateur | [V] |
| $U_{acc,nom}$ | Tension nominale aux bornes d'un accumulateur | [V] |
| U_{charge} | Tension aux bornes de la charge électronique (banc de test) | [V] |
| U_{EST} | Tension aux bornes de l'équipement sous test (banc de test) | [V] |
| U_{source} | Tension aux bornes de la source (banc de test) | [V] |
| \underline{Z} | Impédance complexe | [Ω] |
| Z_{Cauer} | Impédance du circuit mutli-RC selon la structure de Cauer | [Ω] |
| Z_{CPE} | Impédance d'un CPE (Constant Phase Element) | [Ω] |
| \underline{Z}_{exp} | Impédance complexe mesurée par SIE | [Ω] |
| Z_{Foster} | Impédance du circuit mutli-RC selon la structure de Foster | [Ω] |
| \underline{Z}_{mod} | Impédance complexe du modèle | [Ω] |
| $ \underline{Z} $ | Module de l'impédance complexe \underline{Z} | [Ω] |
| Z_d | Impédance de diffusion | [Ω] |
| Z_f | Impédance faradique (inclus le transfert de charge et la diffusion) | [Ω] |
| Z_M | Impédance de diffusion linéaire restreinte | [Ω] |
| Z_W | Impédance de Warburg | [Ω] |
| $Z_{W\delta}$ | Impédance de Nernst | [Ω] |
| Z_1 | Impédance du circuit R_{tc}/C_{dc} | [Ω] |
| Z_2 | Impédance du circuit $R_{\Omega}+R_{tc}/C_{dc}$ | [Ω] |

Chapitre III

| <i>Symbole ou Variable</i> | <i>Désignation / signification</i> | <i>Unité</i> |
|----------------------------|---|------------------------|
| ΔU_{ESR} | Chute de tension due à la résistance interne ESR d'un supercondensateur | [V] |
| τ_{LT} | Constante de temps de la ligne de transmission | [s] |
| ω | Pulsation ($\omega = 2\pi f$) | [rad.s ⁻¹] |
| C_0 | Composante de la capacité BF d'un SCAP (indépendante de la tension) | [F] |
| C_{BF} | Capacité basse fréquence d'un supercondensateur | [F] |
| C_{eq} | Capacité équivalente aux capacités de la première branche (modèle SCAP) | [F] |
| C_{i0} | Capacité de la première branche du modèle de Zubieta et Bonert (indépendante de la tension) | [F] |
| C_{i1} | Capacité de la première branche du modèle de Zubieta et Bonert (dépendante de la tension) | [F] |
| C_l | Capacité de la troisième branche du modèle de Zubieta et Bonert | [F] |
| C_{rc} | Capacité de la deuxième branche du modèle de Zubieta et Bonert | [F] |
| C_{sc} | Capacité d'un supercondensateur | [F] |
| d | Ratio entre les tensions minimale et maximale du supercondensateur | |
| ESR | Résistance interne d'un supercondensateur | [Ω] |
| ESR_{AC} | Résistance interne d'un supercondensateur en HF (à 1 kHz) | [Ω] |
| ESR_{DC} | Résistance interne d'un supercondensateur en BF | [Ω] |
| $f_{0_{sc}}$ | Fréquence délimitant les comportements inductif et capacitif d'un SCAP | [Hz] |
| $Im_{BF}(\underline{Z})$ | Partie imaginaire à basses fréquences de l'impédance complexe \underline{Z} | [Ω] |
| $Im_{HF}(\underline{Z})$ | Partie imaginaire à hautes fréquences de l'impédance complexe \underline{Z} | [Ω] |
| I_{sc} | Courant d'un supercondensateur | [A] |
| $I_{sc_{ch}}$ | Courant de charge d'un supercondensateur | [A] |
| $I_{sc_{dech}}$ | Courant de décharge d'un supercondensateur | [A] |
| K | Coefficient de proportionnalité entre la capacité d'un SCAP et la tension | [F.V ⁻¹] |
| K' | Coefficient de proportionnalité entre la capacité BF d'un SCAP et la tension | [F.V ⁻¹] |
| L_{f2} | Inductance de fuite pour un supercondensateur en hautes fréquences | [H] |
| m_{sc} | Masse d'un supercondensateur | [g] |
| P_{sc_d} | Puissance disponible dans un supercondensateur | [W] |
| $P_{sc_d_{Maxwell}}$ | Puissance spécifique disponible dans un supercondensateur selon Maxwell | [W.kg ⁻¹] |
| $P_{sc_{max}}^*$ | Puissance spécifique maximale dans un supercondensateur | [W.kg ⁻¹] |
| $P_{sc_{max}_{Batscap}}$ | Puissance spécifique maximale dans un supercondensateur selon Batscap | [W.kg ⁻¹] |
| $P_{sc_{max}_{Maxwell}}$ | Puissance spécifique maximale dans un supercondensateur selon Maxwell | [W.kg ⁻¹] |
| R_{BF} | Résistance à basses fréquences pour un supercondensateur | [Ω] |
| R_c | Résistance de contact pour un supercondensateur | [Ω] |
| R_e | Résistance d'électrode pour un supercondensateur | [Ω] |
| R_{HF} | Résistance à hautes fréquences pour un supercondensateur | [Ω] |
| R_i | Résistance de la première branche du modèle de Zubieta et Bonert | [Ω] |
| R_{ion} | Résistance ionique pour un supercondensateur | [Ω] |
| R_l | Résistance de la troisième branche du modèle de Zubieta et Bonert | [Ω] |
| R_{LT} | Résistance de la ligne de transmission | [Ω] |

| <i>Symbole ou Variable</i> | <i>Désignation / signification</i> | <i>Unité</i> |
|----------------------------|---|--------------|
| R_{rc} | Résistance de la deuxième branche du modèle de Zubieta et Bonert | [Ω] |
| U | Tension | [V] |
| U_{sc} | Tension aux bornes d'un supercondensateur | [V] |
| U_{sc_min} | Tension minimale aux bornes d'un supercondensateur | [V] |
| U_{sc_nom} | Tension nominale aux bornes d'un supercondensateur | [V] |
| V_{ci} | Tension aux bornes des condensateurs de la première branche (modèle SCAP) | [V] |
| $W_{branche1}$ | Energie stockée dans les capacités de la première branche (modèle SCAP) | [J] |
| W_{sc} | Energie stockée dans un supercondensateur | [J] |
| \underline{Z}_{exp} | Impédance complexe mesurée par SIE | [Ω] |
| Z_{harm} | Impédance d'une ligne de transmission | [Ω] |
| \underline{Z}_{mod} | Impédance complexe du modèle | [Ω] |
| Z_{sc} | Impédance complexe dans un modèle dynamique de supercondensateur | [Ω] |

Chapitre IV

| <i>Symbole ou Variable</i> | <i>Désignation / signification</i> | <i>Unité</i> |
|----------------------------|---|----------------------|
| <i>ACC1</i> | Batterie d'accumulateurs du bus n°1 | |
| <i>ACC2</i> | Batterie d'accumulateurs du bus n°2 | |
| <i>C_{BF}</i> | Capacité basse fréquence d'un supercondensateur | [F] |
| <i>C_i</i> | Capacité de la première branche | [F] |
| <i>C_{i0}</i> | Capacité de la première branche indépendante de la tension | [F] |
| <i>C_{rc}</i> | Capacité de la deuxième branche | [F] |
| <i>C_{sc}</i> | Capacité d'un supercondensateur | [F] |
| <i>ESR</i> | Résistance interne d'un supercondensateur | [Ω] |
| <i>K</i> | Coefficient de proportionnalité entre la capacité d'un SCAP et la tension | [F.V ⁻¹] |
| <i>R_{BF}</i> | Résistance à basses fréquences pour un supercondensateur | [Ω] |
| <i>R_{HF}</i> | Résistance à hautes fréquences pour un supercondensateur | [Ω] |
| <i>R_i</i> | Résistance de la première branche du | [Ω] |
| <i>R_{rc}</i> | Résistance de la deuxième branche | [Ω] |
| <i>SCAP1</i> | Pack de supercondensateurs du bus n°1 | |
| <i>SCAP2</i> | Pack de supercondensateurs du bus n°2 | |
| <i>T</i> | Température ambiante | [°C] |
| <i>V_{ci}</i> | Tension aux bornes de la capacité de la première branche | [V] |

Chapitre V

| <i>Symbole ou Variable</i> | <i>Désignation / signification</i> | <i>Unité</i> |
|----------------------------|--|--------------|
| η_{sc} | Rendement énergétique d'un supercondensateur | [%] |
| C_{bat} | Capacité nominale d'une batterie d'accumulateurs | [Ah] |
| C_{max} | Capacité maximale d'un accumulateur | [Ah] |
| C_n | Capacité nominale d'un accumulateur | [Ah] |
| C_{pack} | Capacité d'un pack de supercondensateurs | [F] |
| C_{sc} | Capacité d'un supercondensateur | [F] |
| d | Ratio entre les tensions minimale et maximale du supercondensateur | |
| d_{cdc} | Ratio de tension d'un supercondensateur demandé par le cahier des charges | |
| d_{min} | Ratio minimum | |
| DOD | Profondeur de décharge d'un accumulateur | [%] |
| DOD_{cdc} | Profondeur de décharge d'un accumulateur demandé par le cahier des charges | [%] |
| E_0 | Tension à vide d'un accumulateur | [V] |
| E_{bat} | Tension à vide d'une batterie d'accumulateurs | [V] |
| f_{0_bus1} | Fréquence de coupure pour la répartition entre les sources du bus n°1 | [Hz] |
| f_{0_bus2} | Fréquence de coupure pour la répartition entre les sources du bus n°2 | [Hz] |
| f_{acc} | Fréquence liée aux densités de puissance et d'énergie d'un accumulateur | [Hz] |
| f_{sc} | Fréquence liée aux densités de puissance et d'énergie d'un supercondensateur | [Hz] |
| I_{acc} | Courant dans un accumulateur | [A] |
| I_{acc_ch} | Courant de charge d'un accumulateur | [A] |
| I_{acc_dech} | Courant de décharge d'un accumulateur | [A] |
| I_{acc_max} | Courant maximal dans un accumulateur | [A] |
| I_{bat} | Courant dans une batterie d'accumulateurs | [A] |
| I_{bat_max} | Courant maximal dans une batterie d'accumulateurs | [A] |
| I_{elem_max} | Courant maximal dans une cellule de SSE | [A] |
| I_{pack} | Courant dans un pack de supercondensateurs | [A] |
| I_{pack_max} | Courant maximal dans un pack de supercondensateurs | [A] |
| I_{sc} | Courant dans le supercondensateur | [A] |
| I_{sc_max} | Courant maximal dans le supercondensateur | [A] |
| m_{acc} | Masse d'un accumulateur | [g] |
| m_{bat} | Masse d'une batterie d'accumulateurs | [g] |
| m_{pack} | Masse d'un pack de supercondensateurs | [g] |
| m_{sc} | Masse d'un supercondensateur | [g] |
| m_{SSE} | Masse de l'ensemble des SSE (SCAP et ACC) | [g] |
| N_{acc} | Nombre de cellules dans une batterie d'accumulateurs | |
| N_{elem} | Nombre d'éléments dans un SSE | |
| N_{sc} | Nombre de cellules dans un pack de supercondensateurs | |
| Np_{acc} | Nombre de cellules en parallèle dans une batterie d'accumulateurs | |
| Np_{sc} | Nombre de cellules en parallèle dans un pack de supercondensateurs | |

| <i>Symbole ou Variable</i> | <i>Désignation / signification</i> | <i>Unité</i> |
|----------------------------|--|--------------------|
| $N_{S_{acc}}$ | Nombre de cellules en série dans une batterie d'accumulateurs | |
| $N_{S_{sc}}$ | Nombre de cellules en série dans un pack de supercondensateurs | |
| P_{acc} | Puissance dans un accumulateur | [W] |
| P_{bat} | Puissance dans une batterie d'accumulateurs | [W] |
| P_{bat_max} | Puissance maximale dans une batterie d'accumulateurs | [W] |
| P_{max_cdc} | Puissance maximale dans un SSE demandée par le cahier des charges | [W] |
| P_{pack} | Puissance dans un pack de supercondensateurs | [W] |
| P_{pack_max} | Puissance maximale dans un pack de supercondensateurs | [W] |
| P_{sc} | Puissance dans un supercondensateur | [W] |
| P_{sc_max} | Puissance maximale dans un supercondensateur | [W] |
| R_{acc} | Résistance interne (ESR) d'un accumulateur | [Ω] |
| R_{bat} | Résistance interne (ESR) d'une batterie d'accumulateurs | [Ω] |
| R_{pack} | Résistance interne (ESR) d'un pack de supercondensateurs | [Ω] |
| R_{sc} | Résistance interne (ESR) du supercondensateur | [Ω] |
| t_{acc_ch} | Temps de charge d'un accumulateur | [s] |
| t_{acc_dech} | Temps de décharge d'un accumulateur | [s] |
| T_d | Période de décharge d'un supercondensateur | [s] |
| U_{acc} | Tension aux bornes d'un accumulateur | [V] |
| U_{bat} | Tension aux bornes d'une batterie d'accumulateurs | [V] |
| U_c | Tension aux bornes de la capacité du supercondensateur | [V] |
| U_{c_max} | Tension maximale aux bornes de la capacité du supercondensateur | [V] |
| U_{c_min} | Tension minimale aux bornes de la capacité du supercondensateur | [V] |
| U_{max_cdc} | Tension maximale d'un SSE demandée par le cahier des charges | [V] |
| U_{pack} | Tension aux bornes d'un pack de supercondensateurs | [V] |
| U_{sc} | Tension aux bornes d'un supercondensateur | [V] |
| U_{sc_max} | Tension maximale aux bornes d'un supercondensateur | [V] |
| U_{sc_min} | Tension minimale aux bornes d'un supercondensateur | [V] |
| vol_{acc} | Volume d'un accumulateur | [dm ³] |
| vol_{bat} | Volume d'une batterie d'accumulateurs | [dm ³] |
| vol_{pack} | Volume d'un pack de supercondensateurs | [dm ³] |
| vol_{sc} | Volume d'un supercondensateur | [dm ³] |
| W_{acc} | Energie stockée dans un accumulateur | [J] |
| W_{acc_utile} | Energie utile dans un accumulateur | [J] |
| W_{bat} | Energie stockée dans une batterie d'accumulateurs | [J] |
| W_{cdc} | Energie utile dans un SSE demandée par le cahier des charges | [J] |
| W_{max_cdc} | Energie maximale dans un SSE demandée par le cahier des charges | [J] |
| W_{pack} | Energie stockée dans un pack de supercondensateurs | [J] |
| $W_{R_{sc}}$ | Energie dissipée dans la résistance interne d'un supercondensateur | [J] |
| W_{sc_max} | Energie maximale stockée dans un supercondensateur | [J] |
| W_{sc_utile} | Energie utile d'un supercondensateur | [J] |

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Ibrahim, A. Ilinca et J. Perron, «Energy storage systems - Characteristics and comparisons», *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, pp. 1221-1250, 2008.
- [2] T. Christen et M. Carlen, «Theory of Ragone plots», *Journal of Power Sources*, vol. 91, pp. 210-216, 2000.
- [3] A. Allègre, «Méthodologies de modélisation et gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides», *Thèse de doctorat de l'Université de Lille 1*, 6 septembre 2010.
- [4] A. Beauger, J. Haussonne et J. Niepce, «Condensateurs», *Techniques de l'Ingénieur*, vol. E1925, 2007.
- [5] A. Marquet, C. Levillain, A. Davriu, S. Laurent et P. Jaud, «Stockage d'électricité dans les systèmes électriques», *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique*, vol. D4030, 1998.
- [6] F. Perisse, «Etude et analyse des modes de défaillances des condensateurs électrolytiques à l'aluminium et des thyristors, appliquées au système de protection du LHC (Large Hadron Collider)», *Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard, Lyon 1*, 17 juillet 2003.
- [7] Y. Brunet, Problématiques du stockage d'énergie, *Traité Electronique, Génie Electrique, Microsystèmes*, Paris: Lavoisier, 2009.
- [8] S. Raël, B. Davat et F. Belhachemi, «Supercondensateurs à couche double électrique: principes de fonctionnement et comportement électrique», *Journées Electrotechniques du Club EEA, Cachan*, 21-22 mars 2002.
- [9] M. Camara, «Supercondensateurs pour échange dynamique d'énergie à bord du véhicule électrique hybride», *Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté*, 7 décembre 2007.
- [10] J. Lassègues, «Supercondensateurs», *Techniques de l'Ingénieur*, vol. D3334, p. 25, 2001.
- [11] P. Hall et E. Bain, «Energy storage technologies and electricity generation», *Energy Policy*, vol. 36, pp. 4352-4355, 2008.
- [12] Maxwell, «www.maxwell.com», [En ligne]. [Accès en 2010].
- [13] Maxwell Technologies, «Application note - Bootscap energy storage modules - Life duration estimation», Ref. 1012839, 2007.
- [14] P. Venet, «Amélioration de la sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie», *Habilitation à Diriger des Recherches, Université Claude Bernard, Lyon1*, 24 octobre 2007.
- [15] H. Gualous et R. Gallay, «Applications des supercondensateurs», *Techniques de l'Ingénieur*, vol. D3335, p. 12, 2007.
- [16] G. Amatucci, F. Badway, A. Du Pasquier et T. Zeng, «An asymmetric hybrid nonaqueous energy storage cell», *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 148, pp. A930-A939, 2001.
- [17] P. Tixador, «Stockage supraconducteur», *Journée Electrotechnique du Club EEA, Belfort*, 17-18 mars 2010.
- [18] P. Tixador, *Les supraconducteurs - Traité des nouvelles technologies - Série Matériaux*, Paris: Hermès, 1995.
- [19] K. Mazouz, «Stockage supraconducteur d'énergie magnétique pour alimentation impulsionnelle», *Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, Belfort*, 20 décembre 1995.
- [20] G. Cimuca, «Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens», *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris*, 2004.

- [21] F. Faure, «Suspension magnétique pour volant d'inertie», *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble*, 20 juin 2003.
- [22] C. Kerzreho, «Caractérisation et optimisation d'une batterie électromécanique sous chargement cyclique», *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure de Cachan - Antenne de Bretagne*, 8 janvier 2002.
- [23] B. Multon et J. Ruer, «Stocker l'électricité», *Publication du Club ECRIN, Club Energies alternatives*, p. 29, 2003.
- [24] B. Multon, N. Bernard, C. Kerzrého, H. Ben Ahmed, J. Cognard, J. Delamare et F. Faure, «Stockage électromécanique d'énergie (inertiel ou cinétique)», *Présentation du Club ECRIN Energies alternatives, Groupe Stockage d'énergie*, p. 24, 23 mai 2002.
- [25] K. El-Kadri, «Contribution à la conception d'un générateur hybride d'énergie électrique pour véhicule : Modélisation, simulation et dimensionnement», *Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard, Belfort*, 2006.
- [26] G. Caillon, «Accumulateurs portables», *Techniques de l'Ingénieur, Traité d'Electronique*, vol. E2140, p. 34, 2001.
- [27] M. Montaru, «Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages», *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Bron*, 6 juillet 2009.
- [28] J. Robert et J. Alzieu, «Accumulateurs - Accumulateurs au plomb», *Techniques de l'Ingénieur*, vol. D3352, p. 14, 2004.
- [29] J. Robert et J. Alzieu, «Accumulateurs - Considérations théoriques», *Techniques de l'Ingénieur*, vol. D3351, p. 11, 2004.
- [30] P. Van den Bossche, F. Vergels, J. Van Mierlo, J. Matheys et W. Van Autenboer, «SUBAT : an assessment of sustainable battery technology», *Journal of Power Sources*, vol. 162, pp. 913-919, 2006.
- [31] J. Robert et J. Alzieu, «Accumulateurs - Accumulateurs à oxyde de nickel», *Techniques de l'Ingénieur*, vol. D3353, p. 13, 2005.
- [32] Powergenix, «www.powergenix.com», [En ligne]. [Accès en 2010].
- [33] M. Doublet, «Batteries Li-ion - Conception théorique», *Techniques de l'Ingénieur, Traité de l'électronique*, vol. AF6612, p. 14, 2009.
- [34] J. Robert et J. Alzieu, «Accumulateurs - Accumulateurs au lithium», *Techniques de l'Ingénieur*, vol. D3354, p. 15, 2005.
- [35] A. Ritchie et W. Howard, «Recent developments and likely advances in lithium-ion batteries», *Journal of Power Sources*, vol. 162, pp. 809-812, 2006.
- [36] Saft, «www.saftbatteries.com», [En ligne]. [Accès en 2012].
- [37] V. Technologies, «www.valence.com», [En ligne]. [Accès en 2010].
- [38] Kokam, «www.kokam.com», [En ligne]. [Accès en 2010].
- [39] M. Nehrir et C. Wang, «Modeling and control of fuel cells - Distributed generation applications», *IEEE Press*, 2009.
- [40] P. Millet, «Electrolyseurs de l'eau à membrane acide», *Techniques de l'Ingénieur*, vol. J4810, p. 16, 2007.
- [41] O. Langlois, E. Foch, X. Roboam et H. Piquet, «De l'avion plus électrique à l'avion tout électrique : état de l'art et prospective sur les réseaux de bord», *Journée Electrotechnique du Club EEA, Cergy-Pontoise*, 18-19 mars 2004.
- [42] O. Langlois, «Conception d'un réseau de secours électrique pour l'aéronautique», *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*, 22 juin 2006.

- [43] Saft, «Communiqué de presse N°28-09», Le Bourget, 15-21 juin 2009.
- [44] MOET Consorsium, «More Open Electrical Technologies, Technical report, MOET-0.02-AF-DEL-PublicReport-0001-09-R1.0», 11 décembre 2009.
- [45] D. Bienaimé, «Modélisation et gestion de l'énergie d'une poutre électrique pour l'alimentation des auxiliaires de bord d'un aéronef», *Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, Belfort*, 19 décembre 2012.
- [46] F. Baalbergen, P. Bauer et J. Ferreira, «Energy storage and power management for typical 4Q-load», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 1485-1498, Mai 2009.
- [47] L. Boulon, «Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides - Approche systémique pour la gestion d'énergie», *Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, Belfort*, 3 Juillet 2009.
- [48] P. Thounthong, S. Raël et B. Davat, «Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 3225-3233, December 2007.
- [49] C. Abbey et G. Joos, «Supercapacitor energy storage for wind energy applications», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, pp. 769-776, May-June 2007.
- [50] M. Camara, H. Gualous, F. Gustin et A. Berthon, «Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, pp. 2721-2735, September 2008.
- [51] A. Rufer et P. Barrade, «A supercapacitor based energy storage system for elevators with soft commutated interface», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, pp. 1151-1159, September-October 2002.
- [52] J. Van Mierlo, P. Van den Bossche et G. Maggetto, «Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators», *Journal of Power Sources*, pp. 76-89, September 2003.
- [53] N. Gyawali et Y. Ohsawa, «Integrating fuel cell/electrolyzer/ultracapacitor system into a stand-alone microhydro plant», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, pp. 1092-1101, December 2010.
- [54] W. Lhomme, «Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la Représentation Energétique Macroscopique», *Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologie de Lille*, 16 Novembre 2007.
- [55] J. Solano Martinez, «Modélisation et supervision des flux énergétiques à bord d'un véhicule hybride lourd: approche par logique floue de type-2», *Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, Belfort*, 8 Février 2012.
- [56] L. Boulon, D. Hissel, A. Bouscayrol, M. Péra et P. Delarue, «Multi-physics modelling and representation of power and energy sources for Hybrid Electric Vehicles», *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Harbin, Chine, September 2008.
- [57] M. Urbain, M. Hinaje, S. Raël, B. Davat et P. Desprez, «Energetical modeling of lithium-ion batteries including electrode porosity effects», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, pp. 862-872, September 2010.
- [58] J. Diard, B. Le Gorrec et C. Montella, *Cinétique électrochimique*, Paris: Hermann, éditeurs des sciences et des arts, 1996.
- [59] E. Kuhn, C. Forgez et G. Friedrich, «Modèle pour accumulateurs Ni-MH en vue d'une application pour véhicule hybride électrique», GEVIQ, Marseille, Juin 2002.

- [60] F. Huet, «A review of impedance measurements for determination of state-of-charge and state-of-health of secondary batteries», *Journal of Power Sources*, vol. 70, pp. 59-69, 1998.
- [61] E. Kuhn, C. Forgez, P. Lagonotte et G. Friedrich, «Modelling Ni-mH battery using Cauer and Foster structures», *Journal of Power Sources*, vol. 158, pp. 1490-1497, 2006.
- [62] M. Montaru, S. Péliissier et S. Olivier, «Frequency and temporal identification of a Li-ion Polymer battery model using fractional impedance», *International Conference on Advances in Hybrid Powertrains, Rueil-Malmaison*, 25 Novembre 2008.
- [63] Batscap, «www.batscap.com», [En ligne]. [Accès en 2010].
- [64] IEC62391-1, *Fixed electric double-layer capacitors for use in electronic equipment - Part 1 : Generic specification*, International Electrotechnical Commission, 2005.
- [65] N. Rizoug, G. Feld et B. Barbedette, «Hybrid supply for automotive application using supercapacitors», *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, France*, September 2010.
- [66] Batscap, «Measurement methods - Supercapacitor modules», July 2008.
- [67] L. Zubieta et R. Bonert, «Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, pp. 199-205, January-February 2000.
- [68] S. Buller, E. Karden, D. Kok et R. De Doncker, «Modelling the dynamic behaviour of supercapacitors using impedance spectroscopy», *IEEE Industry Applications Conference*, pp. 2500-2504, 2001.
- [69] N. Rizoug, P. Bartholomeüs et P. Le Moigne, «Modelling and characterizing supercapacitors using an online method», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 3980-3990, December 2010.
- [70] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz et A. Berthon, «Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modelling», *Journal of Power Sources*, vol. 165, pp. 928-934, December 2006.
- [71] R. De Levie, «Electrochemical response of porous and rough electrodes», *Advances on Electrochemistry and Electrochemical Engineering, Wiley Interscience, New York*, vol. 6, pp. 329-397, 1967.
- [72] N. Rizoug, «Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance», *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et de l'Université des Sciences et Technologies de Lille*, 28 Février 2006.
- [73] D. Bienaimé, N. Devillers, M. Péra, F. Gustin, A. Berthon et M. Hopdjanian, «Energetic Macroscopic Representation of an electric network embedded in an aircraft», *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, USA*, pp. 1-6, September 2011.
- [74] D. Bienaimé, «Etude d'un réseau de bord d'un aéronef basée sur la Représentation Energétique Macroscopique», *Conférence Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE)*, Belfort, 13 décembre 2011.
- [75] J. Asensio-Sauto, «Modélisation et simulation d'un "starter/generator" fonctionnant sur un bus de tension continue mutlisource pour application aéronautique», *Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE)*, Belfort, 13 décembre 2011.
- [76] J. Hautier et J. Faucher, «Le graphe informationnel causal», *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 90, pp. 167-189, Juin 1996.
- [77] G. Dauphin-Tanguy, *Les bond graphs*, Hermès Science Publication, 2000.
- [78] A. Bousquayrol, «Formalismes de Représentation et de Commande appliqués aux Systèmes Electromécaniques Multimachines Multiconvertisseurs», *Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille*, 22 décembre 2003.

- [79] C. Akli, «Conception systémique d'une locomotive hybride autonome - Application à la locomotive hybride de démonstration et d'investigations en énergétique LHyDIE développée par la SNCF», *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*, 27 Juin 2008.
- [80] W. Hankache, «Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible», *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*, 16 Décembre 2008.
- [81] J. Baert, S. Jemeï, D. Chamagne, D. Hissel, S. Hibon et D. Hegy, «Sizing of a hybrid locomotive», *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, USA*, pp. 1-6, September 2011.
- [82] S. Vazquez, S. Lukic, E. Galvan, L. Franquelo et J. Carrasco, «Energy storage systems for transport and grid applications», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, n° 12, pp. 3881-3895, 2010.

TABLE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure I-1 : Exemple de diagramme de Ragone Energie/Puissance | 6 |
| Figure I-2 : Exemple de diagramme « toile d'araignée » | 7 |
| Figure I-3 : Structure d'un condensateur | 9 |
| Figure I-4 : Diagrammes de Ragone et toile d'araignée - Condensateurs..... | 10 |
| Figure I-5 : Structure d'un supercondensateur | 11 |
| Figure I-6 : Diagrammes de Ragone et toile d'araignée - Supercondensateurs..... | 14 |
| Figure I-7 : Diagrammes de Ragone et toile d'araignée - SMES..... | 16 |
| Figure I-8 : Structure d'un accumulateur d'énergie électromécanique [22]..... | 18 |
| Figure I-9 : Caractéristique de décharge d'un volant d'inertie en fonction de sa vitesse de rotation | 20 |
| Figure I-10 : Diagrammes de Ragone et toile d'araignée – Système volant d'inertie | 20 |
| Figure I-11 : Schéma de principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique [7] | 21 |
| Figure I-12 : Principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-métal [34]..... | 28 |
| Figure I-13 : Principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-ion [34]..... | 30 |
| Figure I-14 : Diagramme de Ragone - Accumulateurs..... | 34 |
| Figure I-15 : Diagrammes « Toile d'araignée » - Accumulateurs | 35 |
| Figure I-16 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible (PAC) | 37 |
| Figure I-17 : Diagrammes de Ragone et toile d'araignée – Système de stockage par hydrogène | 38 |
| Figure I-18 : Diagramme de Ragone – Moyens de stockage | 39 |
| Figure I-19 : Différentes natures d'énergie dans un aéronef conventionnel [41]..... | 40 |
| Figure I-20 : Architecture d'un biréacteur « 3H » à réseaux électriques AC et DC (A330) [41] | 41 |
| Figure I-21 : Architecture d'un biréacteur « 2H+2E » à réseaux électriques AC et DC (A380) [41] | 42 |
| Figure I-22 : Architecture d'un hélicoptère bimoteur [44]..... | 44 |
| Figure I-23 : Architecture de la poutre électrique..... | 46 |
| Figure I-24 : Classification des niveaux de modélisation des systèmes électriques dans l'aéronautique | 48 |
| Figure II-1 : Banc de test pour les accumulateurs | 49 |
| Figure II-2 : Synoptique du banc de puissance | 50 |
| Figure II-3 : Synoptique du banc de test (puissance et supervision)..... | 50 |
| Figure II-4 : Banc de puissance et système d'acquisition | 51 |
| Figure II-5 : Interface graphique de l'impédancemètre | 52 |
| Figure II-6 : Batterie d'accumulateurs LiPo | 52 |
| Figure II-7 : Cellule d'accumulateur Lithium-ion polymère 4,8 Ah..... | 53 |
| Figure II-8 : Relevé des courants de charge et décharge et de la tension aux bornes d'une cellule d'accumulateur | 54 |
| Figure II-9 : Relevé de la tension aux bornes de l'accumulateur à différents régimes de décharge à 20°C | 55 |
| Figure II-10 : Modèle quasi-statique d'un accumulateur..... | 56 |
| Figure II-11 : Relevé de la tension et du courant d'accumulateur – Décharge par palier à 20°C..... | 57 |
| Figure II-12 : Evolution de la tension à vide en fonction de l'état de charge à différentes températures | 58 |
| Figure II-13 : Modélisation de l'évolution de la tension à vide en fonction de l'état de charge..... | 58 |
| Figure II-14 : Evolution de la résistance série en fonction de l'état de charge à différentes températures..... | 59 |
| Figure II-15 : Evolution de la résistance série en fonction de la tension à vide à différentes températures..... | 59 |
| Figure II-16 : Evaluation de la chute de tension dans la résistance série pour une décharge à 10C | 60 |
| Figure II-17 : Modélisation de l'évolution de la résistance en fonction de l'état de charge | 61 |
| Figure II-18 : Evolution de Racc en fonction de SOC et de T (look-up table dans Matlab)..... | 61 |
| Figure II-19 : Décharge d'un accumulateur par un créneau de courant à 20°C | 62 |
| Figure II-20 : Synoptique du modèle quasi-statique sous Matlab Simulink | 63 |
| Figure II-21 : Simulation du modèle quasi-statique en comparaison avec les résultats expérimentaux (à 20°C) | 64 |

| | |
|---|----|
| Figure II-22 : Comparaison des résultats issus de la simulation du modèle et de l'expérimentation (à 20°C) | 64 |
| Figure II-23 : Modèle fondamental électrochimique de l'interface électrode/électrolyte | 65 |
| Figure II-24 : Modèle de Randles | 66 |
| Figure II-25 : Modèle de Randles simplifié | 66 |
| Figure II-26 : Modèle dynamique d'un accumulateur | 67 |
| Figure II-27 : Principe de la spectrométrie d'impédance en mode potentiométrique | 67 |
| Figure II-28 : Circuit $R_{tc} // C_{dc}$ | 69 |
| Figure II-29 : Représentation de l'impédance du circuit $R_{tc} // C_{dc}$ dans le plan de Nyquist | 69 |
| Figure II-30 : Circuit $R_{\Omega} + R_{tc} // C_{dc}$ | 70 |
| Figure II-31 : Représentation de l'impédance du circuit $R_{\Omega} + R_{tc} // C_{dc}$ dans le plan de Nyquist | 70 |
| Figure II-32 : Représentation de l'impédance de Randles selon les trois hypothèses de diffusion | 71 |
| Figure II-33 : Structure de Foster | 73 |
| Figure II-34 : Structure de Cauver | 73 |
| Figure II-35 : Modèle dynamique avec une impédance de diffusion selon la structure de Foster | 73 |
| Figure II-36 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist à 20°C à différents états de charge | 74 |
| Figure II-37 : Relevés de la partie réelle en fonction de la fréquence à 20°C et à différents états de charge | 75 |
| Figure II-38 : Relevés de la partie imaginaire en fonction de la fréquence à 20°C et à différents états de charge | 75 |
| Figure II-39 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist – influence de la température | 76 |
| Figure II-40 : Influence de la température sur la constante de temps du phénomène de transfert de charge ... | 76 |
| Figure II-41 : Influence de la température sur la constante de temps du phénomène de diffusion | 77 |
| Figure II-42 : Spectres d'impédance à 20°C – comparaison entre expérimentation et simulation du modèle dynamique | 77 |
| Figure II-43 : Spectres d'impédance à 20°C – comparaison entre les modèles avec C_{dc} et avec CPE | 78 |
| Figure II-44 : Spectres d'impédance à 40°C – influence du nombre de circuits R-C dans la structure de Foster . | 79 |
| Figure II-45 : Synoptique du modèle dynamique sous Matlab Simulink | 79 |
| Figure II-46 : Simulation des modèles quasi-statique et dynamique en comparaison avec l'expérimentation ... | 80 |
| Figure II-47 : Simulation des modèles quasi-statique et dynamique en comparaison avec l'expérimentation (zoom) | 80 |
| Figure II-48 : Ecart entre les modèles quasi-statique et dynamique et l'expérimentation | 81 |
| Figure III-1 : Cellule de supercondensateur (B650F) | 83 |
| Figure III-2 : Modèle standard d'un supercondensateur | 86 |
| Figure III-3 : Allure de la tension aux bornes d'un supercondensateur lors d'une décharge à courant constant | 88 |
| Figure III-4 : Relevé de la tension d'un supercondensateur 3000F lors d'un essai de charge / décharge | 89 |
| Figure III-5 : Relevé de la tension d'un supercondensateur 3000F lors de la décharge à courant constant | 89 |
| Figure III-6 : Evolution de la capacité d'un supercondensateur en fonction de la température | 90 |
| Figure III-7 : Synoptique du modèle standard sous Matlab Simulink | 90 |
| Figure III-8 : Comparaison entre la simulation du modèle standard et l'expérimentation – SCAP M3000F à 25°C | 91 |
| Figure III-9 : Comparaison entre la simulation du modèle standard et l'expérimentation – SCAP M1200F à 55°C | 91 |
| Figure III-10 : Comparaison entre la simulation du modèle standard et l'expérimentation – SCAP M650F à -20°C | 91 |
| Figure III-11 : Simulation du modèle standard (paramètres identifiés et constructeurs) – SCAP M3000F à 25°C | 92 |
| Figure III-12 : Modèle de Zubieta & Bonert d'un supercondensateur | 93 |
| Figure III-13 : Modèle à deux branches R-C d'un supercondensateur | 93 |
| Figure III-14 : Relevé de la tension d'un supercondensateur M1200F en réponse à un créneau de courant | 95 |
| Figure III-15 : Synoptique du modèle à deux branches R-C sous Matlab Simulink | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figure III-16 : Comparaison entre la simulation du modèle à 2 branches RC et l'expérimentation – SCAP M1200F à 25°C | 96 |
| Figure III-17 : Comparaison entre l'expérimentation et la simulation du modèle standard et du modèle à 2 branches RC – Charge par créneau de courant – SCAP Maxwell 1200F à 25°C | 97 |
| Figure III-18 : Comparaison des modèles – Décharge à courant constant – SCAP Maxwell 1200F à 25°C | 97 |
| Figure III-19 : Modèle dynamique d'un supercondensateur..... | 98 |
| Figure III-20 : Représentation typique de l'impédance d'un supercondensateur dans le plan de Nyquist | 99 |
| Figure III-21 : Modèle dynamique avec un circuit équivalent à constantes localisées | 100 |
| Figure III-22 : Représentation dans le plan de Nyquist du circuit $R_{HF} + C_{BF} + R//C$ | 100 |
| Figure III-23 : Identification des paramètres d'une ligne de transmission à partir d'une réponse fréquentielle | 101 |
| Figure III-24 : Modèle dynamique avec un circuit $R_n//C_n$ équivalent à une ligne de transmission | 102 |
| Figure III-25 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist – SCAP Maxwell 3000F à plusieurs températures et tensions..... | 102 |
| Figure III-26 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist – SCAP Maxwell à 25°C et à plusieurs tensions.. | 103 |
| Figure III-27 : Relevés de la partie réelle en fonction de la fréquence à 25°C et à différentes tensions – SCAP M3000F | 103 |
| Figure III-28 : Evolution des résistances R_{BF} et R_{HF} en fonction de la température – SCAP M3000F | 105 |
| Figure III-29 : Evolution des résistances R_{BF} et R_{HF} en fonction de la température – SCAP B3000F..... | 105 |
| Figure III-30 : Relevés de la partie imaginaire en fonction de la fréquence à 25°C et à différentes tensions – SCAP M1200F | 106 |
| Figure III-31 : Détermination de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes tensions – SCAP M1200F | 107 |
| Figure III-32 : Détermination de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes températures – SCAP M1200F | 108 |
| Figure III-33 : Détermination de la capacité BF en fonction de la tension pour différentes températures – SCAP B1200F | 108 |
| Figure III-34 : Comparaison des spectres d'impédance SCAP M650F à 25°C et 2,7V – Influence du nombre de circuits R-C..... | 109 |
| Figure III-35 : Comparaison des spectres d'impédance SCAP M650F à 25°C et 2,7V – Modélisation des phénomènes BF | 110 |
| Figure III-36 : Modèle dynamique d'un supercondensateur..... | 110 |
| Figure III-37 : Synoptique du modèle dynamique sous Matlab Simulink..... | 111 |
| Figure III-38 : Simulation des modèles standard, à 2 branches R-C et dynamique en comparaison des mesures | 111 |
| Figure III-39 : Comparaison des écarts entre les modèles et l'expérimentation | 111 |
| Figure IV-1 : Schéma structurel de la poutre électrique | 114 |
| Figure IV-2 : Représentation Energétique Macroscopique de la poutre électrique | 116 |
| Figure IV-3 : Profil de charge de la poutre électrique | 119 |
| Figure IV-4 : Profils des charges spécifiques et de fond des bus n°1 et n°2..... | 120 |
| Figure IV-5 : REM de la poutre et sa Structure Maximale de Commande associée (en configuration normale) | 121 |
| Figure IV-6 : Simulation de la poutre électrique – Allure des courants des SSE du bus n°1 | 123 |
| Figure IV-7 : Simulation de la poutre électrique – Evolution des états de charge des SSE du bus n°1 | 124 |
| Figure IV-8 : Profil de courant pour validation des modèles d'accumulateur Li-ion polymère 4,8 Ah | 125 |
| Figure IV-9 : Profil de courant pour validation des modèles de supercondensateur 650F..... | 125 |
| Figure IV-10 : REM de la poutre et sa Structure Maximale de Commande associée (en mode dégradé) | 126 |
| Figure IV-11 : Simulation de la poutre électrique – Allure des courants des SSE du bus n°2 | 127 |
| Figure IV-12 : Simulation de la poutre électrique – Evolution des états de charge des SSE du bus n°2 | 128 |
| Figure IV-13 : Profil de courant pour validation des modèles de supercondensateur 3000F | 129 |
| Figure IV-14 : Logigramme de la démarche pour définir les profils de courant à partir d'un profil de mission . | 129 |

| | |
|--|-----|
| Figure IV-15 : Validation des modèles d’accumulateur – Profil de courant à 40°C – Evolution de la tension | 130 |
| Figure IV-16 : Validation des modèles d’accumulateur – Profil de courant à 40°C – Ecart avec les mesures... | 131 |
| Figure IV-17 : Validation des modèles d’accumulateur – Profil de courant à 20°C – Evolution de la tension | 131 |
| Figure IV-18 : Validation des modèles d’accumulateur – Profil de courant à 20°C – Ecart avec les mesures... | 132 |
| Figure IV-19 : Validation des modèles d’accumulateur – Profil de courant à 0°C – Evolution de la tension | 132 |
| Figure IV-20 : Validation des modèles d’accumulateur – Profil de courant à 0°C – Ecart avec les mesures..... | 133 |
| Figure IV-21 : Validation des modèles de cellule 650F – Profil de courant à 20°C – Evolution de la tension | 135 |
| Figure IV-22 : Validation des modèles de cellule 650F – Profil de courant à 20°C – Ecart avec les mesures | 136 |
| Figure IV-23 : Validation des modèles de cellule 650F – Profil de courant à -20°C – Evolution de la tension | 136 |
| Figure IV-24 : Validation des modèles de cellule 650F – Profil de courant à -20°C – Ecart avec les mesures... | 137 |
| Figure IV-25 : Validation des modèles de cellule 650F – Profil de courant à 55°C – Evolution de la tension | 137 |
| Figure IV-26 : Validation des modèles de cellule 650F – Profil de courant à 55°C – Ecart avec les mesures | 138 |
| Figure IV-27 : Validation des modèles de cellule 3000F – Profil de courant à 20°C – Evolution de la tension ... | 139 |
| Figure IV-28 : Validation des modèles de cellule 3000F – Profil de courant à 20°C – Ecart avec les mesures.. | 139 |
| Figure V-1 : Modèle d’un supercondensateur (modèle standard R-C) | 142 |
| Figure V-2 : Modèle d’un pack de supercondensateurs | 144 |
| Figure V-3 : Algorithme de dimensionnement d’un pack de supercondensateurs..... | 145 |
| Figure V-4 : Modèle d’un accumulateur (modèle quasi-statique) | 147 |
| Figure V-5 : Modèle d’une batterie d’accumulateurs | 148 |
| Figure V-6 : Algorithme de dimensionnement d’une batterie d’accumulateurs | 149 |
| Figure V-7 : Différentes topologies pour l’hybridation d’éléments de stockage | 151 |
| Figure V-8 : REM de la poutre électrique en configuration normale | 152 |
| Figure V-9 : Profil de charge pour le dimensionnement des éléments de stockage du bus n°1..... | 153 |
| Figure V-10 : Gestion fréquentielle pour le dimensionnement des éléments de stockage du bus n°1..... | 154 |
| Figure V-11 : Diagramme de Ragone – Cellules d’accumulateur et de supercondensateur | 155 |
| Figure V-12 : Projection du diagramme de Ragone sur un plan fréquentiel – Cellules des sources du bus n°1. | 156 |
| Figure V-13 : Synoptique du dimensionnement des éléments de stockage du bus n°1 | 156 |
| Figure V-14 : Puissance et énergie des SSE du bus n°1 suivant la gestion énergétique fréquentielle | 157 |
| Figure V-15 : Evolution de la masse des SSE du bus n°1 en fonction de la fréquence de coupure..... | 158 |
| Figure V-16 : Profil de charge pour le dimensionnement des éléments de stockage du bus n°2..... | 159 |
| Figure V-17 : Gestion fréquentielle pour le dimensionnement des éléments de stockage du bus n°2..... | 160 |
| Figure V-18 : Projection du diagramme de Ragone sur un plan fréquentiel – Cellules des sources du bus n°2. | 160 |
| Figure V-19 : Puissance et énergie des SSE du bus n°2 suivant la gestion énergétique fréquentielle | 161 |
| Figure V-20 : Diagramme Energie/Puissance – Supercondensateur..... | 163 |
| Figure V-21 : Diagramme Energie/Puissance – Accumulateur..... | 165 |
| Figure V-22 : Diagramme Energie/Puissance – Pack de supercondensateurs SCAP1 | 165 |
| Figure V-23 : Diagramme Energie/Puissance – Batterie d’accumulateurs ACC1 | 166 |
| Figure V-24 : Allure des courants demandés aux SSE au cours de la mission | 167 |
| Figure V-25 : Diagramme Energie/Puissance de la source SCAP1 au cours de la mission | 167 |
| Figure V-26 : Diagramme Energie/Puissance – Complément au dimensionnement de SCAP1 | 168 |
| Figure V-27 : Diagramme Energie/Puissance – Complément au dimensionnement de ACC1..... | 168 |
| Figure V-28 : Synoptique de la démarche pour la validation du dimensionnement des SSE du bus n°1..... | 169 |
| Figure V-29 : Validation du dimensionnement des SSE du bus n°1 – Résultats de simulation à 20°C (fc = 5mHz) | 170 |
| Figure V-30 : Validation du dimensionnement des SSE du bus n°1 – Résultats de simulation à 0°C (fc = 5mHz) | 170 |
| Figure V-31 : Validation du dimensionnement des SSE du bus n°1 – Résultats de simulation à 0°C (fc = 1,5mHz) | 171 |
| Figure V-32 : Synoptique de la démarche pour la validation du dimensionnement des SSE du bus n°2..... | 171 |
| Figure V-33 : Validation du dimensionnement des SSE du bus n°2 – Résultats de simulation à 20°C..... | 172 |

| | |
|--|-----|
| Figure VII-1 : Extraits de la fiche technique de l'accumulateur Lithium-Polymère 4,8 Ah de Kokam [38]..... | 180 |
| Figure VII-2 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist à 0°C à différents états de charge | 183 |
| Figure VII-3 : Relevés de la partie réelle en fonction de la fréquence à 0°C et à différents états de charge | 183 |
| Figure VII-4 : Relevés de la partie imaginaire en fonction de la fréquence à 0°C et à différents états de charge | 184 |
| Figure VII-5 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist à 40°C à différents états de charge | 185 |
| Figure VII-6 : Relevés de la partie réelle en fonction de la fréquence à 40°C et à différents états de charge | 185 |
| Figure VII-7 : Relevés de la partie imaginaire en fonction de la fréquence à 40°C et à différents états de charge | 186 |
| Figure VII-8 : Simulation du modèle quasi-statique en comparaison avec les résultats expérimentaux (à 0°C) | 187 |
| Figure VII-9 : Simulation du modèle quasi-statique en comparaison avec les résultats expérimentaux (à 40°C) | 187 |
| Figure VII-10 : Spectres d'impédance à 40°C – comparaison entre expérimentation et simulation du modèle | 188 |
| Figure VII-11 : Spectres d'impédance à 0°C – comparaison entre expérimentation et simulation du modèle .. | 188 |
| Figure VII-12 : Résultats expérimentaux – Décharge à courant constant – SCAP Maxwell 3000F à 25°C | 194 |
| Figure VII-13 : Résultats expérimentaux – Décharge à courant constant – SCAP Maxwell 1200F à 40°C | 194 |
| Figure VII-14 : Résultats expérimentaux – Décharge à courant constant – SCAP Maxwell 650F à 55°C | 195 |
| Figure VII-15 : Résultats expérimentaux – Décharge à courant constant – SCAP Batscap 650F à 10°C | 195 |
| Figure VII-16 : Résultats expérimentaux – Décharge à courant constant – SCAP Batscap 1200F à -5°C | 196 |
| Figure VII-17 : Résultats expérimentaux – Décharge à courant constant – SCAP Batscap 3000F à -20°C | 196 |
| Figure VII-18 : Relevé de la tension d'un supercondensateur B3000F en réponse à un créneau de courant | 198 |
| Figure VII-19 : Relevé de la tension d'un supercondensateur B1200F en réponse à un créneau de courant | 198 |
| Figure VII-20 : Relevé de la tension d'un supercondensateur B650F en réponse à un créneau de courant | 199 |
| Figure VII-21 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist – SCAP Batscap 3000F à plusieurs températures et tensions..... | 200 |
| Figure VII-22 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist – SCAP Maxwell 1200F à plusieurs températures et tensions..... | 200 |
| Figure VII-23 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist – SCAP Batscap 1200F à plusieurs températures et tensions..... | 201 |
| Figure VII-24 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist – SCAP Maxwell 650F à plusieurs températures et tensions..... | 201 |
| Figure VII-25 : Spectres d'impédance dans le plan de Nyquist – SCAP Maxwell 650F à plusieurs températures et tensions..... | 202 |
| Figure VII-26 : Evolution de la capacité C_{BF} en fonction de la température et de la tension – SCAP M3000F | 202 |
| Figure VII-27 : Evolution de la capacité C_{BF} en fonction de la température et de la tension – SCAP B3000F | 203 |
| Figure VII-28 : Evolution de la capacité C_{BF} en fonction de la température et de la tension – SCAP M1200F | 203 |
| Figure VII-29 : Evolution des résistances R_{BF} et R_{HF} en fonction de la température et de la tension – SCAP M1200F | 204 |
| Figure VII-30 : Evolution de la capacité C_{BF} en fonction de la température et de la tension – SCAP B1200F | 204 |
| Figure VII-31 : Evolution des résistances R_{BF} et R_{HF} en fonction de la température et de la tension – SCAP B1200F | 205 |
| Figure VII-32 : Evolution de la capacité C_{BF} en fonction de la température et de la tension – SCAP M650F | 205 |
| Figure VII-33 : Evolution des résistances R_{BF} et R_{HF} en fonction de la température et de la tension – SCAP M650F | 206 |
| Figure VII-34 : Evolution de la capacité C_{BF} en fonction de la température et de la tension – SCAP B650F | 206 |
| Figure VII-35 : Evolution des résistances R_{BF} et R_{HF} en fonction de la température et de la tension – SCAP B650F | 207 |
| Figure VII-36 : Comparaison entre l'expérimentation et la simulation des modèles standard et à 2 branches RC – Décharge à courant constant – SCAP Batscap 1200F à 25°C | 207 |

| | |
|--|-----|
| Figure VII-37 : Comparaison entre l'expérimentation et la simulation des modèles standard et à 2 branches RC – Décharge à courant constant – SCAP Batscap 3000F à 25°C | 208 |
| Figure VII-38 : Comparaison entre l'expérimentation et la simulation des modèles standard et à 2 branches RC – Décharge à courant constant – SCAP Batcap 650F à 25°C | 208 |
| Figure VII-39 : Représentation de l'impédance d'un circuit R//CPE (d'ordres 1, 0.8 et 0.65) dans le plan de Nyquist | 210 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau I-1 : Criteres d'évaluation et de comparaison des moyens de stockage | 8 |
| Tableau I-2 : Caractéristiques des différentes technologies de condensateur [4]..... | 9 |
| Tableau I-3 : Caractéristiques des différentes technologies de supercondensateur [5]..... | 12 |
| Tableau I-4 : Caractéristiques des différentes technologies de volant d'inertie..... | 18 |
| Tableau I-5 : Caractéristiques d'un élément Accumulateur Plomb-acide [26], [27], [29], [30] | 24 |
| Tableau I-6 : Caractéristiques d'un élément Accumulateur Ni-Cd [26], [27], [29], [30], [31] | 25 |
| Tableau I-7 : Caractéristiques d'un élément Accumulateur Ni-MH [26], [27], [29] | 26 |
| Tableau I-8 : Caractéristiques d'un élément Accumulateur Ni-Zn [32]..... | 27 |
| Tableau I-9 : Technologies d'accumulateurs au lithium..... | 28 |
| Tableau I-10 : Caractéristiques d'un élément Accumulateur Li-métal..... | 29 |
| Tableau I-11 : Matériaux d'insertion anodiques pour accumulateur Li-ion..... | 29 |
| Tableau I-12 : Matériaux d'insertion cathodiques pour accumulateur Li-ion..... | 30 |
| Tableau I-13 : Caractéristiques d'un élément Accumulateur Li-ion [26], [29] | 30 |
| Tableau I-14 : Caractéristiques de l'électrode positive d'un accumulateur Lithium-ion « LCO » [26]..... | 31 |
| Tableau I-15 : Caractéristiques de l'électrode positive d'un accumulateur Lithium-ion « LMS » [26] | 31 |
| Tableau I-16 : Caractéristiques d'un élément Accumulateur Lithium-Phosphate [37]..... | 32 |
| Tableau I-17 : Caractéristiques d'un élément Accumulateur Lithium-Métal Polymère [38] | 33 |
| Tableau I-18 : Caractéristiques d'un élément Accumulateur Lithium-ion Polymère | 34 |
| Tableau I-19 : Synthèse des caractéristiques tension à vide et energie spécifique des accumulateurs | 34 |
| Tableau I-20 : Comparaison de l'énergie spécifique de différents moyens de stockage | 38 |
| Tableau II-1 : Spécifications techniques d'un accumulateur Li-ion polymère 4,8 Ah (données constructeur) [38] | 53 |
| Tableau II-2 : Résultats des essais de détermination de la capacité de stockage de la cellule 4,8Ah..... | 55 |
| Tableau II-3 : Evolution de la résistance série en fonction de l'état de charge – décomposition de Racc | 62 |
| Tableau II-4 : Résultats de l'identification des paramètres du modèle dynamique à 20°C | 75 |
| Tableau III-1 : Cellules de supercondensateurs Maxwell et Batscap | 84 |
| Tableau III-2 : Spécifications techniques des supercondensateurs (données constructeurs [63], [12])..... | 84 |
| Tableau III-3 : Courant de charge et décharge pour la détermination de la capacité | 87 |
| Tableau III-4 : Comparaison entre les paramètres des fiches constructeurs et ceux issus de l'expérimentation | 89 |
| Tableau III-5 : Comparaison des paramètres du modèle à deux branches R-C – Maxwell et Batscap 1200F..... | 95 |
| Tableau III-6 : Comparaison des capacités de stockage – Modèle standard et modèle à deux branches R-C..... | 95 |
| Tableau III-7 : Comparaison des résistances BF – Datasheets, essais DC et SIE – SCAP 3000F..... | 104 |
| Tableau III-8 : Comparaison des résistances à 1 kHz – Datasheets et SIE – SCAP 3000F | 104 |
| Tableau III-9 : Comparaison des capacités BF – Datasheets, essais DC et SIE – SCAP 1200F..... | 107 |
| Tableau III-10 : Comparaison des capacités – Modèle à deux branches R-C et paramètres obtenus par SIE – SCAP1200F | 107 |
| Tableau III-11 : Paramètres du modèle dynamique identifiés à partir d'une SIE à 25°C et à 2,7V – SCAP M650F | 109 |
| Tableau IV-1 : Eléments de la Représentation Energétique Macroscopique | 116 |
| Tableau IV-2 : Exemple de profil de mission type pour un aéronef | 119 |
| Tableau V-1 : Base de données pour le dimensionnement d'un pack de supercondensateurs [12] | 154 |
| Tableau V-2 : Base de données pour le dimensionnement d'une batterie d'accumulateurs [38] | 155 |
| Tableau V-3 : Influence de la fréquence de coupure sur les puissances et énergies des SSE du bus n°1..... | 157 |
| Tableau V-4 : Influence de la fréquence de coupure sur les puissances et énergies des SSE du bus n°2..... | 161 |
| Tableau VII-1 : Résultats expérimentaux – Décharge par palier d'un accumulateur à 20°C..... | 181 |
| Tableau VII-2 : Résultats expérimentaux – Décharge par palier d'un accumulateur à 40°C..... | 181 |

| | |
|---|-----|
| Tableau VII-3 : Résultats expérimentaux – Décharge par palier d’un accumulateur à 0°C..... | 182 |
| Tableau VII-4 : Résultats de l’identification des paramètres du modèle dynamique à 0°C | 184 |
| Tableau VII-5 : Résultats de l’identification des paramètres du modèle dynamique à 40°C | 184 |
| Tableau VII-6 : Paramètres du modèle standard – SCAP Maxwell 3000F | 196 |
| Tableau VII-7 : Paramètres du modèle standard – SCAP Batscap 3000F | 197 |
| Tableau VII-8 : Paramètres du modèle standard – SCAP Maxwell 1200F | 197 |
| Tableau VII-9 : Paramètres du modèle standard – SCAP Batscap 1200F | 197 |
| Tableau VII-10 : Paramètres du modèle standard – SCAP Maxwell 650F | 197 |
| Tableau VII-11 : Paramètres du modèle standard – SCAP Batscap 650F | 197 |
| Tableau VII-12 : Paramètres du modèle à deux branches R-C – Supercondensateurs Batscap..... | 199 |



SPIM

■ École doctorale SPIM 16 route de Gray F - 25030 Besançon cedex
■ tél. +33 (0)3 81 66 66 02 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr