

NNT : 2017UBFCD061

**THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE
PREPAREE A L'UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE**

Ecole doctorale n° 37

Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques

Doctorat de Énergie Électrique

Par

PIERRE SAENGER

Optimisation et gestion d'énergie d'un système hybride électrique embarqué

Soutenue le 29 novembre 2017

Composition du Jury :

M BERNARD DAVAT	Président du jury	Université de Lorraine
M RACHID OUTBIB	Rapporteur	Université de Marseille-Aix
M XAVIER ROBOAM	Rapporteur	Université de Toulouse III
M DAVID DEFOUR	Examineur	Université de Perpignan
M RAPHAËL COUTURIER	Directeur de la thèse	Université de Bourgogne/Franche-Comté
MME MARIE-CÉCILE PÉRA	Co-Directrice de la thèse	Université de Bourgogne/Franche-Comté
MME KARINE DESCHINKEL	Encadrante	Université de Bourgogne/Franche-Comté
M FRÉDÉRIC GUSTIN	Encadrant	Université de Bourgogne/Franche-Comté

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés à l'institut FEMTO-ST (Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Techniques). Ils s'inscrivent dans le cadre du projet GESEFA dont l'objectif est d'optimiser la masse d'un système électrique hybride embarqué sur aéronef.

Cette thèse a été réalisée en partenariat avec deux des sept départements de recherche du laboratoire; le département DISC qui traite des sciences informatiques et le département Énergie qui travaille sur la conversion et la gestion d'énergie.

Je souhaite remercier, tout d'abord, la Région Franche-Comté pour le financement de ce projet de recherche.

Je tiens également à remercier sincèrement :

Monsieur Bernard Davat, Professeur des Universités à l'Université de Lorraine, pour avoir assuré les fonctions de président du jury ;

Monsieur Rachid Outbib, Professeur des Universités à l'Université de Marseille-Aix pour avoir rapporté ma thèse avec intérêt et rigueur ;

Monsieur Xavier Roboam, Directeur de Recherche du CNRS au Laboratoire de LAPLACE de Toulouse pour avoir accepté d'examiner mes travaux dont les questions et discussions m'ont été très profitables.

Monsieur David Defour, Maître de conférence à l'Université de Perpignan, pour avoir examiné avec attention mes travaux.

J'éprouve une grande reconnaissance pour tous mes encadrants, sans lesquels, à 53 ans, je ne serais jamais arrivé au bout d'une telle démarche.

Merci Frédéric Gustin, Maître de Conférence à l'Université de Bourgogne - Franche-Comté, pour avoir suivi mon travail et m'avoir aidé.

Merci Karine Deschinkel, Maître de Conférence HDR à l'Université de Bourgogne - Franche-Comté. Le temps investi, la pertinence des remarques et des questions m'ont permis de découvrir, en partie, le domaine très intéressant de l'optimisation.

Merci Marie-Cécile Péra, Professeure à l'Université de Bourgogne - Franche-Comté. Son exigence, mais aussi ses encouragements, m'ont permis d'être auto-critique vis-à-vis de mon travail, d'être davantage pertinent et d'apprécier le milieu de la recherche.

Enfin, merci Raphaël Couturier, Professeur à l'Université de Bourgogne - Franche-Comté. Ses encouragements, notamment lors de la rédaction de ce manuscrit, son aide m'ont permis de clôturer positivement un nouveau chapitre de ma vie. Sa manière d'être doit être un exemple pour tous.

Je remercie également :

Les doctorants et docteurs du laboratoire pour leur bienveillance : Ali et Ahmed mes deux amis irakiens du département DISC ; Simon, Matthieu, Hamza et Hailong mes "co-bureliers" avec lesquels on a pu avoir quelques franches rigolades durant ces trois années ; Élodie, Rania, Loïc et Raffaele.

Les collègues des départements Energie et DISC, enseignants, chercheurs, ingénieurs, techniciens, personnels administratifs : spécialement Nathalie Devillers pour toutes les explications fournies durant la première moitié de ce travail de thèse ; Karine Diez pour tout le temps passé à bien vouloir relire et corriger les "méchantes fautes d'orthographe" qui ont réussi à s'immiscer dans ce manuscrit ; Isabelle Christen et Laurence Mary qui ont toujours été disponibles pour m'aider dans mes démarches administratives.

Enfin, je voudrais exprimer ma profonde gratitude à mes amis : Muriel et Denis, Catherine et François, Stéphane qui m'ont supporté durant ces années et n'ont pas hésité à faire le déplacement à Belfort pour la soutenance.

Ainsi qu'à deux personnes que je connais depuis toujours et qui m'ont hébergé durant les premiers mois de mon cursus : Alice et Pierre Kluz.

Je remercie ma mère, ma seule famille, pour son soutien inconditionnel et lui dédie ce mémoire.

"La science moderne est un admirable monument qui fait honneur à l'espèce humaine et qui compense (un peu) l'immensité de sa bêtise guerrière"

Hubert Reeves (1932-)

SOMMAIRE

1	Introduction générale	1
2	État de l'art : Stockage de l'énergie électrique dans les aéronefs	5
1	Existant dans l'aéronautique - Stockage de l'énergie électrique dans les aéronefs	5
1.1	Stockage et énergie électrique dans les avions conventionnels	6
1.2	Stockage et énergie électrique dans les avions "plus électriques"	7
1.3	Tendances futures - Évolutions possibles	9
1.3.1	Composants d'électronique de puissance de technologie SiC	10
1.3.2	Système électrique hybride pile à combustible - batteries	10
1.4	Stockage et énergie électrique dans les hélicoptères	11
1.4.1	Existant dans les hélicoptères	11
1.4.2	Stockage, bus AC, bus DC à bord	12
2	Bus alternatif ou continu	13
3	Les éléments de stockage	14
3.1	Spécificités des différents moyens de stockage	14
3.2	Choix du/des moyens de stockage pour notre système hybride	15
4	Architecture de l'hélicoptère bimoteur proposé pour le projet	17
5	Modélisation des éléments de stockage	18
5.1	Modélisation de la batterie	19
5.1.1	Modèle quasi-statique	19
5.1.2	Caractérisation du modèle quasi-statique	19
5.1.3	Performances du modèle quasi-statique	21
5.1.4	Modèle dynamique	22
5.1.5	Caractérisation et performances du modèle dynamique	23
5.2	Modélisation du supercondensateur	24
5.2.1	Modèle quasi-statique	24
5.2.2	Caractérisation du modèle quasi-statique	24
5.2.3	Modèle dynamique	26
5.2.4	Performances du modèle dynamique	27

6	Assemblage en série et en parallèle des modèles	28
6.1	Assemblage en série et en parallèle des modèles quasi-statiques	28
6.2	Assemblage en série et en parallèle des modèles dynamiques	30
6.2.1	Application de la tolérance "constructeur" aux modèles dynamiques	31
6.2.2	Association en série des cellules	31
6.2.3	Association en parallèle des branches de cellules	32
7	Conclusion de l'État de l'art : Stockage de l'énergie électrique dans les aéronefs	35
3	Architectures hybrides existantes	37
1	Positionnement des travaux	37
2	Choix des architectures/Spécificités	40
3	Profil de mission étudié	43
4	Répartition des puissances aux différents packs pour notre projet	44
5	Convertisseur Boost DC/DC	45
5.1	Nécessité du convertisseur Boost	45
5.2	Applications	45
5.3	Choix du convertisseur et mise en place	46
5.4	Rapport de puissance et de masse pour un convertisseur donné	48
6	Hybridation pack de batteries / supercondensateurs - performances	49
6.1	Composants considérés lors de ce travail	49
6.2	Gestion fréquentielle des composants des packs	50
6.3	Dimensionnement des packs	51
6.3.1	Dimensionnement d'un pack de batteries	51
6.3.2	Dimensionnement d'un pack de supercondensateur	54
6.3.3	Conclusion sur le dimensionnement des packs	55
6.4	Performances des cellules des packs	55
6.5	Performances électriques des différents systèmes hybrides	56
6.6	Performances des différents systèmes hybrides : durée de vie et coût	58
6.7	Influence de la température	60
7	Conclusion sur les architectures existantes	62
4	Optimisation de la masse des systèmes hybrides	63
1	Modèle d'optimisation général	63
1.1	Fonction-objectif	63
1.2	Variables d'optimisation	64

1.2.1	fréquence de coupure (f_c)	64
1.2.2	Profondeur de décharge des batteries (DOD)	65
1.2.3	Ratio de tension des supercondensateurs (d_{sc})	65
1.2.4	Caractéristiques des cellules	66
1.2.5	Température (T)	67
1.3	Complément sur la fonction-Objectif	67
1.4	Contraintes	68
1.4.1	Contraintes "a priori"	68
1.4.1.1	Contraintes sur l'énergie électrique à stocker	68
1.4.1.2	Contraintes sur la tension initiale	69
1.4.1.3	Nombre minimum de branches en parallèle	70
1.4.2	Contraintes "a posteriori"	70
1.4.2.1	Contraintes sur le courant maximum demandé	70
1.4.2.2	Contraintes sur la tension minimale de sortie d'un pack	72
1.4.2.3	Contraintes venant du convertisseur Boost DC/DC	72
2	Méthode de résolution	73
2.1	Algorithme de recherche de solutions optimales	73
2.2	Recherche de solutions admissibles de masse minimale	74
2.3	Méthode d'optimisation utilisée	76
3	Optimisation : État de l'art	76
4	Méthode d'optimisation du recuit simulé	79
4.1	Principe du recuit simulé	79
4.2	Intérêt de la méthode du recuit simulé	81
5	Méthode d'optimisation par algorithme génétique	82
5.1	Intérêt des algorithmes génétiques	82
5.2	Principe des algorithmes génétiques	83
6	Modifications apportées à la fonction-objectif en fonction de l'architecture choisie	88
7	Conclusion sur l'optimisation de la masse des systèmes hybrides	91
5	Analyse et vérification du dimensionnement par architecture électrique	93
1	Fonctionnement et caractéristiques des systèmes	93
1.1	Stratégie mise en place aux basses températures	94
1.2	Architecture pack de batteries seul (BAT)	95
1.3	Architecture pack de batteries avec un convertisseur	97

1.4	Architecture pack de batteries avec un convertisseur et pack de supercondensateurs avec un convertisseur	100
1.5	Architecture pack de batteries avec un convertisseur et pack de supercondensateurs sur le bus DC	105
1.6	Architecture pack de batteries sur le bus DC et pack de supercondensateurs avec un convertisseur	110
1.7	Architecture pack de batteries et pack de supercondensateurs connectés à un convertisseur	113
2	Validation des caractéristiques trouvées par optimisation	115
2.1	Modèles dynamiques des batteries	116
2.2	Caractérisation de la batterie "Kokam 2Ah"	117
2.2.1	But et présentation de l'expérience	117
2.2.2	Capacité de la batterie à une température spécifique	118
2.2.3	Identification des caractéristiques internes de la batterie	118
2.2.4	Résultats obtenus	122
2.3	Association de batteries en série et en parallèle	123
2.3.1	Répartition du courant demandé dans chacune des branches du pack - tension de sortie du pack	124
2.3.2	Association des batteries en série et en parallèle sous Matlab et Simulink	124
2.4	Modèles dynamiques des supercondensateurs	127
2.5	Association de supercondensateurs en série et en parallèle	128
2.5.1	Répartition du courant demandé dans chacune des branches du pack - tension de sortie du pack	128
2.5.2	Association des supercondensateurs en série et en parallèle sous Matlab et Simulink	129
2.6	Validation du système par Représentation Énergétique Macroscopique (REM)	132
2.6.1	Système pack de batteries seules	133
2.6.2	Système pack de batteries avec convertisseur	134
2.6.3	Système pack de batteries avec convertisseur et pack de supercondensateurs avec convertisseur	137
2.6.4	Système pack de batteries avec convertisseur et pack de supercondensateurs sur le bus	139
2.6.5	Système pack de batteries sur le bus et pack de supercondensateurs avec convertisseur	143
2.6.6	Système pack de batteries associé au pack de supercondensateurs avec convertisseur	145
3	Synthèse des résultats obtenus après optimisation et validation	148

3.1	Architecture Pack de batteries seul	149
3.2	Architecture Pack de batteries avec un convertisseur	149
3.3	Architecture Pack de batteries avec un convertisseur et pack de supercondensateurs avec un convertisseur	150
3.4	Architecture pack de batteries avec un convertisseur et pack de supercondensateurs sur le bus DC	150
3.5	Architecture pack de batteries sur le bus DC et pack de supercondensateurs avec un convertisseur	151
3.6	Architecture pack de batteries et pack de supercondensateurs connectés à un convertisseur	151
4	Conclusion sur l'analyse et vérification du dimensionnement par architecture . .	152

6 Conclusion et perspectives **153**

A Annexes **175**

1	Glossaire	176
2	Fiche technique - Li-ion polymere 2Ah	179
3	Fiche technique - Li-ion polymere 4,8Ah	179
4	Supercondensateurs Maxwell	181
5	Supercondensateurs Batscap	184
6	Estimation des pertes de puissance par architecture	186
6.1	Pertes pour l'architecture "pack de batteries seul"	186
6.2	Pertes pour l'architecture "pack de batteries avec convertisseur"	186
6.3	Pertes pour l'architecture "pack de batteries avec convertisseur et pack de supercondensateurs avec convertisseur"	187
6.4	Pertes pour l'architecture "pack de batteries avec convertisseur et pack de supercondensateurs sur le bus DC"	187
6.5	Pertes pour l'architecture "pack de supercondensateurs avec convertisseur et pack de batteries sur le bus DC"	188
6.6	Pertes pour l'architecture "pack de supercondensateurs, pack de batteries couplés à un convertisseur"	188

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Avec le développement des activités humaines, les besoins énergétiques sont croissants : il y a plus d'industries, plus d'appareils électriques, plus de véhicules ...

Ce sont essentiellement les ressources non renouvelables, pétrole, gaz, charbon, qui alimentent la production d'énergie. En France métropolitaine, en 2016, ces énergies représentent 89,6% de la consommation [97].

De plus, leur consommation produit une grande quantité de déchets polluants l'atmosphère terrestre, responsables du réchauffement climatique. La journée, les sols emmagasinent la chaleur des rayons du soleil. Cette dernière est restituée la nuit et mieux conservée qu'auparavant grâce à une plus forte concentration de gaz à effet de serre (CO_2) dans l'atmosphère.

Les conséquences commencent à s'en faire ressentir concrètement, avec l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, des inondations et des tempêtes, avec les premiers réfugiés climatiques au Bangladesh menacés par la montée des eaux.

La transition énergétique doit permettre de réduire cette production de gaz à effet de serre en utilisant des énergies propres et sûres, mais aussi, en augmentant l'efficacité énergétique des appareils des consommateurs.

L'intermittence de la production d'énergie propre entraîne un souci de disponibilité. Les éoliennes ne produisent que lorsqu'il y a du vent ; les panneaux solaires, du soleil ; le pélamis, des vagues...

Ceci, pose la question sur la stabilité et la qualité de l'énergie propre. Pour résoudre ce problème, le stockage de cette énergie, sous diverses formes, et la possibilité d'une restitution ultérieure sont nécessaires.

Le secteur du transport représente 38% de la consommation de l'énergie française [95]. Il s'agit d'un domaine dans lequel l'efficacité énergétique peut être améliorée.

Actuellement, la voiture "tout électrique" ou hybride commence à se démocratiser et contribue à la diminution de l'utilisation d'hydrocarbures.

Pour la voiture "tout batterie", des progrès sur le stockage de l'énergie électrique sont toujours nécessaires. L'autonomie de celle-ci est encore trop faible pour une utilisation sur de grands trajets. De plus, l'impossibilité de réapprovisionnement en énergie à tout endroit et en un temps court, est un frein à son emploi.

Pour les aéronefs, l'aventure "Solar impulse" (Figure 1.1) a montré que l'avion "tout électrique" en est à ses balbutiements. Ici, l'objectif était de rendre l'appareil totalement autonome en énergie, sans apport de départ. Le plus grand frein à la réussite de son tour du monde a été la masse à embarquer pour stocker l'énergie électrique produite. L'ajout de 600kg de batteries au lithium pour une capacité totale de 260Wh/kg, pour une masse totale de 2,3 tonnes [81], permet les vols de nuit. Mais cela nécessite l'utilisation de matériaux ultra-légers et limite le nombre de personnes pouvant embarquer, puisque une partie de l'énergie stockée sert à faire voler les éléments de stockage eux-mêmes.

Plus récemment encore, en octobre 2016, l'hélicoptère "Volta" (Figure 1.2), cent pour cent électrique, a fait son premier vol sur l'héliport de Paris-Issy-les-Moulineaux; et ceci, grâce à des batteries Lithium-ion d'une capacité de 22kWh pour une masse de 165kg. Son autonomie est évaluée à 14,5 minutes [94].



FIGURE 1.1 – Avion "Solar Impulse" autonome en énergie [96].



FIGURE 1.2 – Hélicoptère 100% électrique "Volta" [92].

Toutefois, l'énergie massique des dispositifs actuels de stockage reste faible et insuffisante aux regards des besoins des aéronefs "classiques" pour les faire décoller, atterrir et les maintenir en vol.

Les progrès réalisés dans les domaines du stockage/restitution de l'énergie électrique et de l'électronique de puissance, ouvrent des pistes non encore envisagées, dont une réduction de la masse de l'appareillage permettant ainsi d'économiser du carburant d'origine fossile et/ou d'augmenter la masse pouvant être embarquée.

Pour les hélicoptères, cadre de cette thèse, il existe des batteries embarquées destinées au démarrage hors parking et au mode dégradé d'urgence. Celles-ci ne sont donc pas utilisées pendant le vol. On dépense donc du carburant pour faire voler des batteries qui ne participent pas à la fourniture électrique.

Cette source d'énergie pourrait alimenter les appareils électriques de plus en plus présents à bord et, également, remplacer progressivement les différents types d'énergie embarquée.

Ainsi, des économies sont envisageables, et cela grâce à un gain en fiabilité et une maintenance simplifiée.

Le terme d'aéronef "plus électrique" est alors utilisé.

Cette volonté "plus électrique" nécessite une gestion d'énergie et une optimisation du système de stockage en combinant différents types de stockage d'énergie électrique transportables et complémentaires du point de vue de leur caractéristiques. Plusieurs types d'architectures électriques regroupant ces sources de stockage sont envisageables.

Avant d'énoncer les architectures hybrides électriques possibles, un état de l'art sur les différents moyens de stockage embarqués de l'énergie électrique est abordé, en vue de les comparer, différents critères sont définis pour chacun d'eux. Cette étude de la complémentarité des différents éléments permet de faire un choix de composants à utiliser. Des éléments aux caractéristiques complémentaires sont alors chacun regroupé en série et en parallèle. Une hybridation de ces packs, répondant à nos exigences, est alors envisageable.

Ce choix de composants permet de déterminer les différents modèles électriques à utiliser. Un des modèles sert à l'identification des caractéristiques des packs, l'autre, plus précis, à leur validation. L'association en série et en parallèle des modèles y est expliquée.

La répartition des puissances sur l'ensemble de l'aéronef se fait par l'intermédiaire d'une poutre électrique (bus). Conjointement, les avantages et inconvénients des différentes caractéristiques possibles du bus sont décrites. Ce choix permet de définir le type de convertisseur réalisant le couplage entre composants de stockage et bus.

L'objectif principal est alors de développer un outil d'aide à la décision pour le choix d'une architecture et le dimensionnement des sources. On cherche à minimiser la masse embarquée tout en garantissant la fourniture électrique pendant la mission en introduisant un critère de gestion d'énergie et en tenant compte de la température ambiante. L'algorithme d'optimisation proposé fournit un dimensionnement pour 6 architectures électriques, différent selon le type de source et le type de connexion au bus. Les performances obtenues et les limites vis à vis du profil de mission sont analysées.

Le second chapitre est consacré aux différentes architectures hybrides disponibles dans la littérature associant des packs de cellules de stockage électrique. Plusieurs systèmes sont définis et comparés entre eux en fonction de différents critères tels que la qualité de tension, le nombre d'éléments dans le pack, la masse... Le type de cellules a été déterminé au préalable. L'incidence de l'architecture sur la durée de vie, le coût, le nombre de convertisseurs à utiliser est également détaillé.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation et à la résolution du problème de minimisation de la masse. Il s'agit de déterminer, pour chaque modèle d'architecture électrique, le nombre et le type de cellules unitaires (accumulateurs et supercondensateurs) parmi une base de données, qui permettent de répondre aux besoins énergétiques (énergie et puissance) et qui constituent des systèmes dont la masse est minimisée. Le problème de dimensionnement est formalisé sous forme d'un problème de minimisation d'une fonction masse (somme des masses du pack accumulateurs et du pack super-condensateurs, et masses des convertisseurs additionnels) dépendante de plusieurs variables (résistance, capacité, décharge, fréquence de coupure, température, ...). Un algorithme de recuit simulé est utilisé pour résoudre le problème.

Enfin, le dernier chapitre présente l'ensemble des caractéristiques des packs issues de l'optimisation. Cela permet de définir la contrainte électrique la plus pénalisante pour chacun des systèmes hybrides.

Les systèmes trouvés nécessitent une validation. La gestion d'énergie doit garantir une réponse

des sources de stockage à une demande de puissance venant de la charge. La répartition de cette demande entre sources de stockage est réalisée par consigne de courant.

Quelle que soit cette demande, la valeur de tension du bus doit être maintenue.

Une Représentation Énergétique Macroscopique (REM) permet la vérification du comportement de l'architecture étudiée.

Des modèles "plus fins" de sources de stockage (servant à la validation) sont assemblées en fonction des caractéristiques de packs trouvées lors de l'optimisation.

Cette thèse, coordonnée par les départements du "DISC" et "ENERGIE" du laboratoire de recherche Femto-st, s'inscrit dans la continuité du projet GEOSEFA. Le travail effectué porte sur des systèmes devant être embarqués. Elle fait suite à trois autres thèses dont les thèmes sont complémentaires. Celle de D. Bienaimé est relative à la gestion d'une poutre électrique pour alimenter des auxiliaires de bord d'un aéronef et à son évaluation numérique (soutenue en 2012); celle de J. Asensio-Sauto porte sur 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 (soutenue en 2014); et celle de N. Devillers sur la caractérisation et modélisation de différents éléments de stockage électrochimique et électrostatique (soutenue en 2012). Cette dernière thèse a traité la possibilité des éléments à être embarqués et nous permis de déterminer le type de stockage d'énergie électrique adapté en fonction de divers critères.

ÉTAT DE L'ART : STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AÉRONEFS

Tout comme les efforts faits pour se diriger vers des véhicules électriques, la recherche s'oriente également vers des aéronefs plus électriques. Les motivations sont identiques à celles des véhicules, avec pour objectifs la réduction de la masse (tout kilogramme de systèmes embarqués coûte environ 1000\$US [72]), des émissions et de la consommation de carburant. Ce chapitre présente un état de l'art des différents moyens de stockage embarqués dans les aéronefs (avions ou hélicoptères).

Il s'agit également de déterminer le ou les composants de stockage d'énergie électrique pouvant être embarqués et répondant aux contraintes d'énergie et de puissance demandées. Ces sources d'énergie sont connectées directement sur un bus ou par l'intermédiaire d'un convertisseur. C'est pourquoi il peut être intéressant de comparer les avantages et inconvénients de l'utilisation d'un bus à courant continu (DC) et/ou d'un bus à courant alternatif (AC), par rapport à notre critère principal : la masse.

Enfin, différents types de sources d'énergie pouvant être embarqués sont étudiés et sélectionnés en fonction des différents critères souhaités.

1/ EXISTANT DANS L'AÉRONAUTIQUE - STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AÉRONEFS

Dans les avions traditionnels, les systèmes de bord, hors propulsion, sont alimentés par plusieurs sources d'énergie de nature différente : hydraulique, électrique et pneumatique. La tendance actuelle consiste à tendre vers le "tout électrique". Grâce au progrès fait en électronique de puissance en terme de performance et de fiabilité, les systèmes de puissances peuvent être actionnés par l'énergie électrique. Il est également possible de stocker plus efficacement cette énergie grâce à l'amélioration générale du rapport quantité d'énergie embarquée/encombrement [68].

1.1/ STOCKAGE ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AVIONS CONVENTIONNELS

L'avion de transport commercial conventionnel utilise généralement une tension alternative de 115 V à une fréquence de 400 Hz. Dans cette architecture, un générateur est couplé au moteur principal via un entraînement mécanique (Figure 2.1) [82]. Pour un biréacteur, l'ensemble est doublé en cas de défaillance d'un moteur.

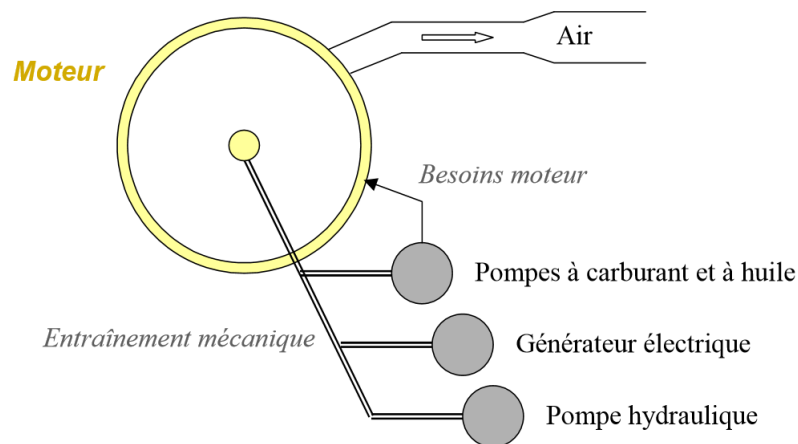


FIGURE 2.1 – Différentes natures d'énergie dans un aéronef conventionnel [20]

Les systèmes de contrôle, le dégivrage, l'hydraulique et le démarrage principal du moteur ne sont pas alimentés par de l'énergie électrique. La génération d'énergie électrique requise par moteur est inférieure à l'avion "plus électrique".

Pour cette architecture à tension à amplitude et fréquence constantes, l'énergie électrique est principalement utilisée pour alimenter les systèmes électroniques embarqués, les ventilateurs qui font circuler l'air dans l'avion, l'éclairage et les équipements permettant d'agrémenter le vol des passagers (téléviseurs, réfrigérateur, four, cafetière...) [8], [9], [11], [58]. Les ventilateurs fonctionnent généralement à 400 Hz. Il n'y a pas de convertisseur de puissance, leurs moteurs sont directement connectés sur le bus [13]. Par conséquent, lors de leur démarrage, un courant d'appel six à dix fois plus élevé que le courant nominal est possible [55].

Sur la figure 2.2 :

- L'avion conventionnel dispose également d'un bus 28V continu. Cette tension est obtenue en transformant et en redressant la tension du bus AC de 115V [10]. De ce bus continu de 28V, il est également obtenu des tensions de 5V et 3,3V continues pour alimenter les circuits intégrés et microprocesseurs des systèmes électroniques [51].

- L'Unité de Puissance Auxiliaire (APU : Auxiliary Power Unit) est une source supplémentaire d'énergie électrique qui fournit généralement de l'énergie lorsque l'avion est au sol. Les APU peuvent également fournir de l'énergie en l'air sous certaines conditions d'exploitation, y compris les urgences.

- De plus, une turbine à air (RAT : Ram Air Turbine) peut être utilisée pour fournir une alimentation électrique ou hydraulique dans des conditions d'urgence. La RAT est une petite éolienne et est déployée par le pilote en cas de défaillance de toutes les autres sources.

1. EXISTANT DANS L'AÉRONAUTIQUE - STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AÉRONEFS

- Les différents packs de batteries existants dans l'avion servent au démarrage de l'APU et fournissent une alimentation de secours pour les équipements critiques dans le poste de pilotage ainsi que d'autres fonctions importantes telles que l'éclairage de secours pour les allées [47].

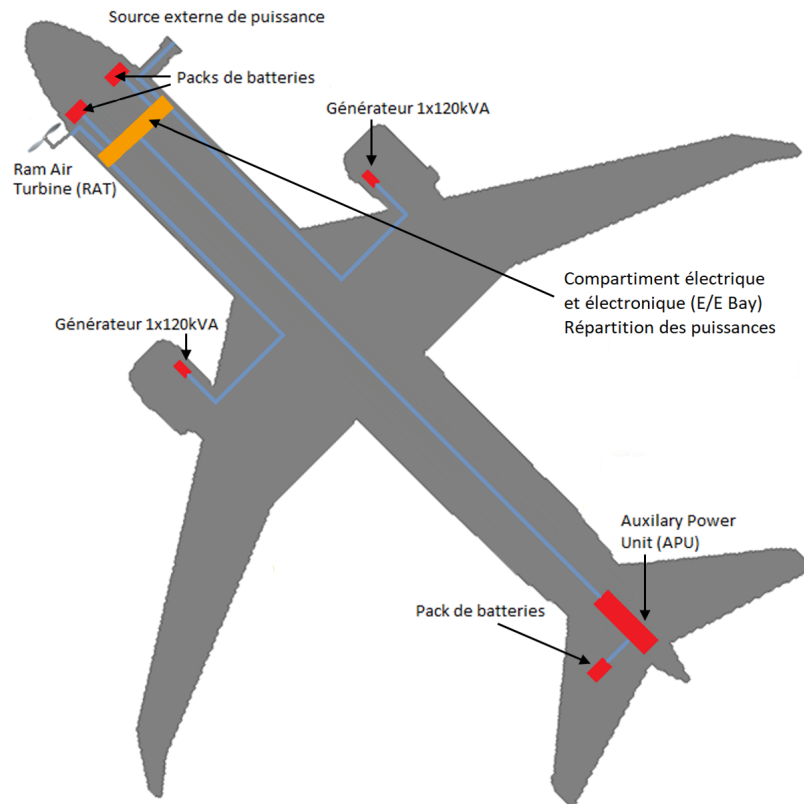


FIGURE 2.2 – Architecture d'un biréacteur à réseaux électriques AC et DC (Airbus A330). Toutes les charges sont connectées à l'E/E Bay. (inspirée de [93])

Du seul compartiment "E/E Bay" (Electrical and Electronic Bay) situé à l'avant vient la réponse aux demandes de puissance des différentes charges, réparties sur l'ensemble de l'avion.

1.2/ STOCKAGE ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AVIONS "PLUS ÉLECTRIQUES"

Dans les appareils tels que les avions Airbus A350, A380 et le Boeing 787, la tension du bus principal est toujours à amplitude constante (115V AC ou 230V AC). La fréquence du signal devient variable et est proportionnelle à la vitesse du moteur (entre 350 et 800Hz) [12].

Avec l'avion "plus électrique", des systèmes hydraulique, mécanique et pneumatique sont remplacés par des systèmes électriques. Les nouvelles charges qui en résultent, nécessitent davantage de convertisseurs.

Il ne reste plus qu'un bus AC sur lequel viennent se greffer des convertisseurs à proximité de l'endroit où leur puissance de sortie est nécessaire [82] pour les charges de 28V DC, de 230V AC-400Hz et de +/- 270V DC (Figure 2.3). Pour des raisons de sécurité, l'ensemble est toujours dédoublé.

Des convertisseurs DC/DC sont également nécessaires pour recharger les batteries.

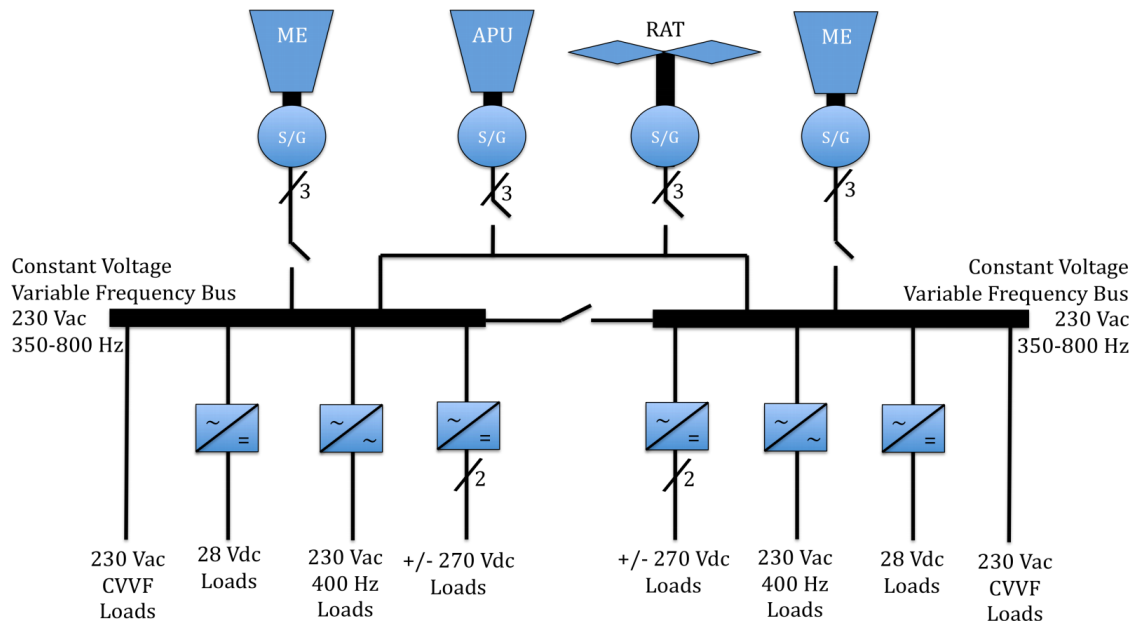


FIGURE 2.3 – Bus de tension à amplitude constante, à fréquence variable pour avion "plus électrique" [82].

L'avion "plus électrique" dispose de deux E/E Bay et d'unités éloignées de puissance (Figure 2.4). Ceci permet de répartir plus aisément les charges sur l'ensemble de l'appareil, mais aussi de réduire la longueur du câblage, donc des pertes électriques.

Ainsi, même dans le cas où l'électrification n'améliore pas le poids, le volume et le coût initial de l'avion, les économies potentielles grâce à une fiabilité accrue et à une maintenance réduite peuvent avoir un avantage économique [24]. La réduction de la consommation de carburant et de l'impact environnemental liée à l'électrification de l'avion a été examinée dans [66].

Sur l'appareil "plus électrique" (Figure 2.4) :

- Dans le cas des Airbus A350 et A380, un générateur, ou deux dans le cas du Boeing 787, sont connectés sur chacun des réacteurs.

- L'unité de puissance auxiliaire (APU) est toujours présente. En fonction de l'appareil, un (Airbus A350 et A380) ou deux (Boeing 787) générateurs sont connectés sur l'APU.

- Pour les Airbus A350 et A380, la turbine à air (RAT) fournit, en cas d'urgence, une puissance électrique au réseau. Une étude a également démontré qu'il était possible de réduire la masse de ce système de 25%, en hybridant la RAT avec un pack de supercondensateurs [52] [62].

Pour le Boeing 787, la RAT n'est plus présente.

1. EXISTANT DANS L'AÉRONAUTIQUE - STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AÉRONEFS

- Les packs de batteries ont pour fonction l'alimentation électrique autonome du démarrage des moteurs, des groupes auxiliaires de puissance et de l'alimentation électrique en cas de défaillance ou panne de système de génération électrique en vol.

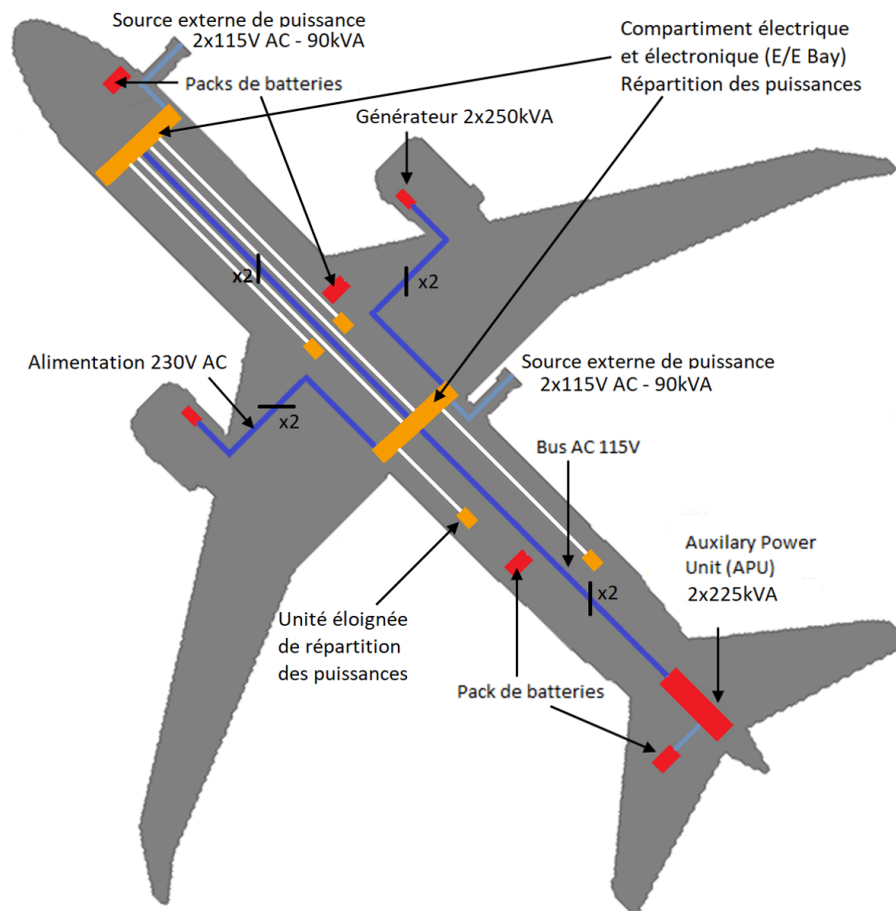


FIGURE 2.4 – Architecture d'un biréacteur à réseaux électriques AC et DC (Boeing 787). Les charges sont réparties sur les deux E/E Bay ou sur les unités éloignées.(inspirée de [93])

Sur l'avion Boeing 787, l'énergie électrique remplace :

- l'énergie pneumatique. Le contrôle environnemental (ECS) de pressurisation et de la température dans la cabine et du dégivrage se fait grâce à 4 compresseurs électriques de 100kW [3].
- l'énergie hydraulique nécessaire au système de freinage grâce à des actionneurs électro-hydrauliques [48].

Sur l'avion Airbus A380, une faible part d'énergie électrique est stockée dans des supercondensateurs pour alimenter le système d'urgence d'ouverture des portes.

1.3/ TENDANCES FUTURES - ÉVOLUTIONS POSSIBLES

Il ressort des différents articles de l'état de l'art, deux avancées possibles à court terme : - en remplaçant les composants de l'électronique de puissance de technologie Si des différents

convertisseurs par des composants de technologie SiC.

- en utilisant l'énergie "hydrogène" pour tout déplacement de l'appareil sur le tarmac de l'aéroport.

1.3.1/ COMPOSANTS D'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE DE TECHNOLOGIE SiC

La technologie SiC est un candidat prometteur pour remplacer la technologie actuelle Si. L'efficacité des redresseurs et des onduleurs SiC est nettement supérieure à celle de leurs homologues Si en raison d'une meilleure conduction et de pertes de commutation moindres [77]. La capacité d'utilisation du SiC à plus haute température est également un avantage [72] [73]. Les systèmes de refroidissement deviennent moins conséquents.

1.3.2/ SYSTÈME ÉLECTRIQUE HYBRIDE PILE À COMBUSTIBLE - BATTERIES

Actuellement, l'avion est transporté de la porte d'embarquement du terminal vers le tarmac à l'aide d'un remorqueur. Une fois dégagé de l'aérogare, l'appareil se dirige vers les pistes de l'aéroport en utilisant la poussée principale du moteur. Ceci implique une continuelle alternance entre la puissance de ralenti et une poussée minimale ; ce n'est pas souhaitable car les moteurs principaux consomment des quantités importantes de carburant dans pareil cas [63].

Cette opération de roulage est une condition d'opération suboptimale pour le moteur. En raison de la taille et du trafic de certains des principaux aéroports, le roulage nécessite de longues distances et beaucoup de temps. Pour résoudre ce problème, il a été proposé d'utiliser des moteurs électriques intégrés dans la roue avant de l'avion [31]. Cela permet aux moteurs principaux de rester éteints avant le décollage. Après l'atterrissage, ces moteurs électriques à commande directe permettraient d'arrêter les moteurs principaux et d'obtenir le roulage électrique du tarmac à la porte de l'aérogare.

Cette nouvelle technologie intégrée à l'avion est communément appelée e-taxi ou taxi vert [64]. Cette architecture est illustrée à la figure 2.5, avec des sources d'énergie potentielles.

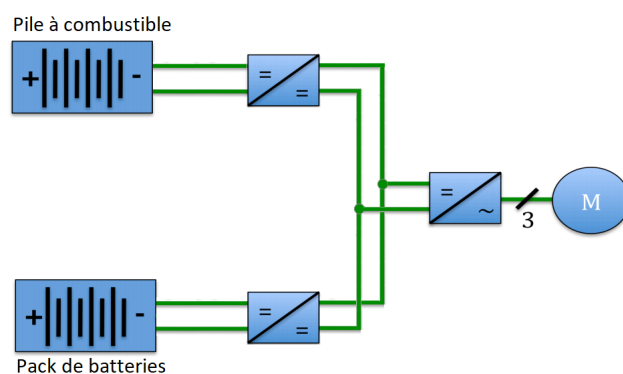


FIGURE 2.5 – Principe de fonctionnement du taxi vert ou e-taxi

Le bénéfice de ce sous-système est la capacité à réduire les émissions et l'utilisation du carburant. Les autres avantages sont l'élimination des remorqueurs dans les aéroports, ainsi que la simplification de la logistique et des opérations aéroportuaires, réduisant ainsi le risque d'accidents.

1. EXISTANT DANS L'AÉRONAUTIQUE - STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AÉRONEFS

1.4/ STOCKAGE ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES HÉLICOPTÈRES

Tout comme pour les avions, il est envisagé de remplacer partiellement ou complètement les différents types d'énergie présents dans l'hélicoptère par l'énergie électrique. L'amélioration de l'électronique de puissance et du stockage permet d'obtenir un rapport puissance/masse intéressant.

1.4.1/ EXISTANT DANS LES HÉLICOPTÈRES

Sur un hélicoptère lourd équipé de deux turbines, la puissance installée pour les systèmes auxiliaires est divisée comme suit [67] :

- électrique : générateurs 3 x 40 kVA (bus 115V AC / 400Hz).
- hydraulique : 60 kW (3 pompes mécaniques + 1 pompe électrique).
- mécanique : 30kW pour le compresseur et les ventilateurs permettant la climatisation.
- pneumatique : 100 kW pour le chauffage, le refroidissement, l'air conditionné et le dégivrage.

L'**énergie pneumatique** est utilisée pour les systèmes de chauffage, certains systèmes de démarrage du moteur, les systèmes auxiliaires comme la détection et la protection contre la glace ... Cette énergie est créée à bord en prenant le flux d'air du générateur de moteur ou de l'APU. Cette prise d'air implique un impact significatif sur les performances du moteur.

Pour le système de démarrage du moteur, tous les hélicoptères Airbus sont déjà équipés d'un circuit de démarrage électrique.

L'**énergie hydraulique** est principalement utilisée pour alimenter les commandes de vol et le train d'atterrissage. Le rapport puissance / masse de cette énergie est attrayant, mais cette énergie entraîne des contraintes de maintenance et les coûts associés. Un autre impact positif important de la suppression de l'hydraulique est la suppression d'un fluide inflammable potentiel qui peut générer un effet dangereux en cas de fuite de fluide combinée avec un défaut électrique dans la même zone [69].

L'augmentation du besoin électrique a plusieurs causes :

- Davantage de systèmes sont embarqués. Entre autres des systèmes supplémentaires sont nécessaires pour les vols pour toutes les conditions météorologiques (climatisation, dégivrage et systèmes d'alerte d'obstacles), pour l'amélioration du confort (bruit et vibration dans l'habitacle), pour le ravitaillement en vol (hélicoptère militaire).
- Le remplacement des actionneurs hydrauliques (treuil, commande de vol, train d'atterrissage), ainsi que des commandes manuelles et mécaniques (direction des roues, frein, rotor) par des actionneurs électriques [67].

Sur l'hélicoptère X4 (rebaptisé H160) (Figure 2.6), Airbus helicopters prévoit d'implanter des actionneurs secondaires électriques sur les gouvernes de profondeur et de direction situés sur la queue. Éliminer le liquide hydraulique, inflammable et sous haute pression, simplifie la maintenance.

Pour les monomoteurs, en cas de panne, un moteur électrique maintient le régime de rotation du rotor [76].

Airbus Helicopters H160	
	Rôle Transport léger, multirôle
	Constructeur Airbus Helicopters
	Premier vol 13 juin 2015
	Coût unitaire 15 millions USD
	H160
Motorisation	
Moteur	Turbomeca Arrano 1A
Nombre	2
Puissance unitaire	1 100-1 300 ch
Nombre de pales	5
Masses	
Maximale	6 000 kg
Performances	
Vitesse de croisière	296 km/h
Distance franchissable	834 km

FIGURE 2.6 – Hélicoptère Airbus X4 rebaptisé H160 [104].

Pour les hélicoptères bimoteurs (Figure 2.7), la consommation importante en carburant vient en partie du fait que les deux moteurs fonctionnent en permanence. En vol de croisière, un seul suffirait. On peut envisager de maintenir le second en rotation au ralenti, chambre de combustion éteinte. Mais il faut pouvoir le faire redémarrer en quelques secondes. Il faut donc rallumer la chambre et accélérer rapidement le générateur de gaz [76].

H225M Caracal		Équipage	Performances
	Rôle Hélicoptère militaire de transport armé	2 (1 commandant de bord + 1 pilote) + 1 mécanicien équipage + 28 passagers ou 11 civières et 4 soignants	
		Motorisation	
		Moteur	Turbomeca Makila 2A1 ²
		Nombre	2
		Type	Turbomoteurs
Constructeur Airbus Helicopters (depuis janvier 2014)	Premier vol 27 novembre 2000	Puissance unitaire	1 776 kW, soit 2 382 ch
		Nombre de pales	• Rotor principal : 5 • Rotor anticouple : 4
		Masses	
		À vide	5 330 kg
		Charge utile	5 670 kg
Mise en service février 2005	Coût unitaire > 20 millions de dollars	Carburant	• Interne : 1 538 kg • Additionnel : de 243 à 1 875 kg
		Maximale	11 200 kg
		Armement	
		Interne	2 mitrailleuses MAG-58 de 7,62 mm
		Externe	2 paniers LAU-3/A de 19 roquettes 2,75 pouces

FIGURE 2.7 – Hélicoptère militaire Airbus H225M [105].

1.4.2/ STOCKAGE, BUS AC, BUS DC À BORD

Les hélicoptères disposent des mêmes bus à tension alternative et continue présents dans les avions conventionnels. La valeur de la tension du bus alternatif est de 115V AC et sa fréquence fixe est de 400 Hz. Celle du bus à tension continue est de 28V et est obtenue en transformant et redressant la tension du bus AC.

La source d'énergie électrique principale est obtenue par les alternateurs connectés aux turbines. Une source d'énergie auxiliaire APU est connectée sur le bus AC et, en cas d'urgence, un

générateur de secours sur le bus DC.

Enfin, lorsque l'hélicoptère est au sol, des sources stationnaires peuvent être connectées (DC EPU, AC EPU) pour recharger les batteries et répondre à la phase de démarrage.

Les réseaux électriques de ce type d'aéronefs ainsi que les éléments de stockage (batteries) sont pour la plupart identiques. Ces derniers sont directement connectés sur le bus DC de 28V (Figure 2.8) [41] [68].

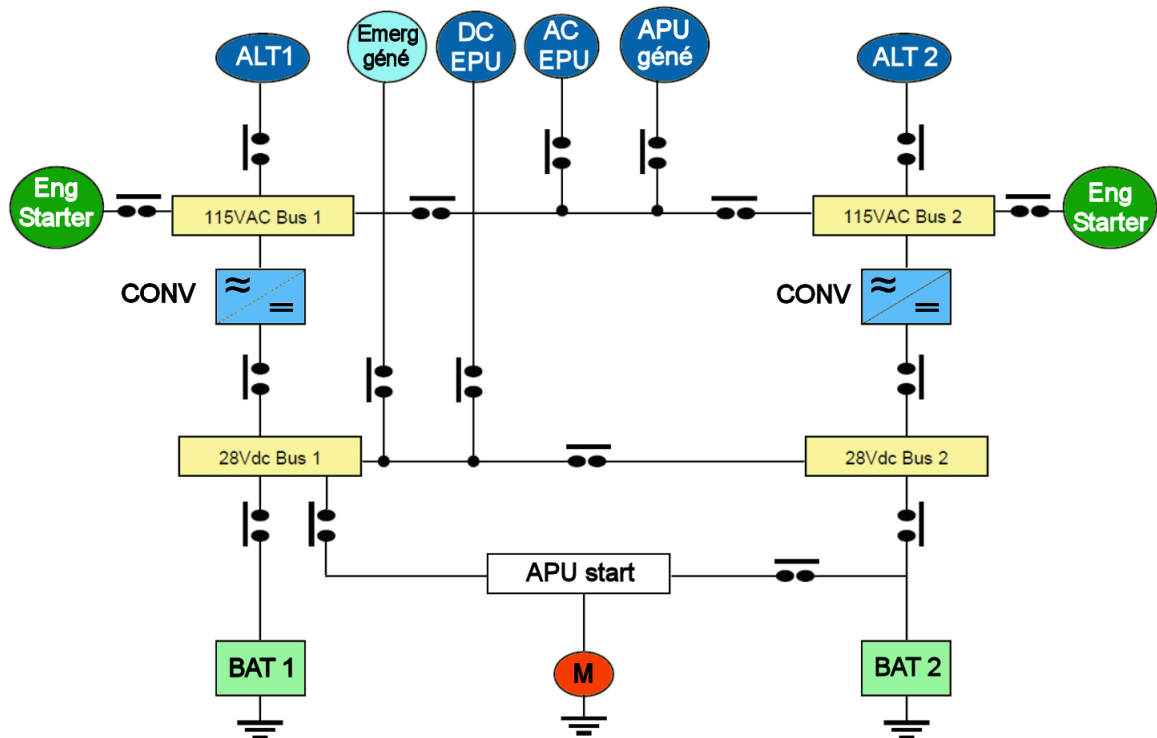


FIGURE 2.8 – Architecture simplifiée d'un hélicoptère bimoteur

CONV : système transformateur/redresseur de 115V AC à 28V DC

APU (Auxiliary Power Unit) : groupe générateur auxiliaire

AC EPU (Alternative Current External Power Unit) : prise de parc AC

DC EPU (Direct Current External Power Unit) : prise de parc DC

Emerg (Emergency générateur) : générateur de secours

2/ BUS ALTERNATIF OU CONTINU

Le retour du courant continu se fait à la fin des années 1990, aidé par le développement de l'électronique de puissance qui permet la conception de convertisseurs AC/DC, DC/AC ou DC/DC de plus en plus puissants et performants en terme de rendement et de montée en tension [83].

Pour une application stationnaire, Weiss et al [86] ont estimé les économies d'électricité sur un banc de test, fonctionnant à 380 V DC, incluant la production de photovoltaïque, la charge de véhicule électrique (EV), l'éclairage et les charges électroniques. Cette étude, bien qu'expérimentale, a également utilisé des valeurs moyennes de pertes dues aux convertisseurs. Les

économies du système de distribution DC par rapport à un système AC équivalent, ont été estimées aux alentours de 5,5%.

Pour les applications embarqués, des études récentes en collaboration avec Airbus, montrent l'intérêt des systèmes à bus DC permettant une réduction de la masse, une meilleure flexibilité et une intégration de nouveaux types de sources [79].

Admettant la présence d'une majorité de sources d'énergie redistribuant une tension continue et n'étant pas mis en service de manière ponctuelle, ainsi que le remplacement d'une majorité des dispositifs de l'hélicoptère par des charges à courant continu, les avantages associés au réseau DC sont :

- Une plus grande fiabilité et une meilleure qualité d'alimentation en raison d'un nombre moins important de convertisseurs par rapport au réseau AC.
- Une transmission de puissance sans composante réactive due à la fréquence.
- Les frais d'entretien et de réparation. Le fait d'avoir moins de composants dans le système et de disposer d'une électronique de puissance plus simple pour les appareils du réseau DC, entraîne des coûts de maintenance et de réparation moins élevés par rapport au système AC [107].
- Une simplification des méthodes de récupération de l'énergie

3/ LES ÉLÉMENTS DE STOCKAGE

Cette thèse fait suite au travail réalisé par N. Devillers [68] sur la "Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique". Il s'agit de déterminer les différents éléments de stockage de l'énergie électrique pouvant être embarqués et répondant à des contraintes énergétiques spécifiques. Parmi ceux-ci, on trouve les bobines supraconductrices (SMES), les volants d'inertie, les accumulateurs électrochimiques (au plomb, au nickel et au lithium), le stockage et la production d'électricité par la filière hydrogène (pile à combustible), les supercondensateurs et les condensateurs.

3.1/ SPÉCIFICITÉS DES DIFFÉRENTS MOYENS DE STOCKAGE

Le moyen de stockage idéal dispose à la fois d'une puissance spécifique élevée et d'une grande densité d'énergie. Il apparaît sur le diagramme de Ragone qu'aucun de ces moyens ne présente ces propriétés. C'est la raison pour laquelle, on s'oriente vers une association de composants de stockage dont le rapport Énergie/Puissance est complémentaire.

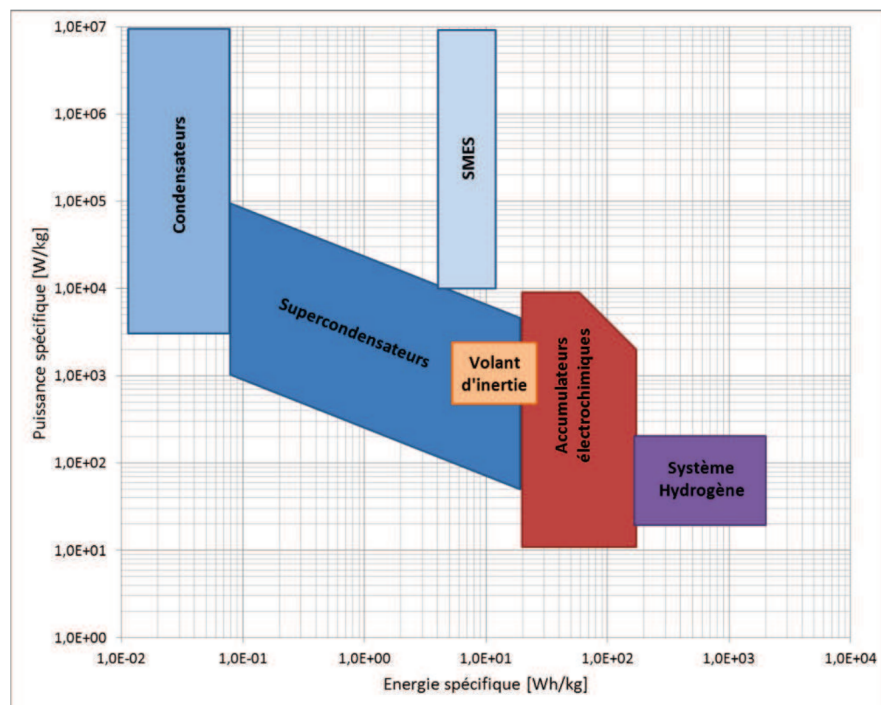


FIGURE 2.9 – Diagramme de Ragone sur les moyens de stockage [68]

Les condensateurs sont trop peu énergétiques et ne peuvent convenir pour notre système hybride embarqué.

Les SMES sont essentiellement connectés au réseau et nécessitent un environnement cryogénique ($\approx -150^{\circ}\text{C}$) [33] [38]. Leurs performances sont intéressantes (plus puissants que les supercondensateurs à densité d'énergie équivalente) mais leur mise en œuvre est difficile, surtout dans l'optique d'une application embarquée.

Les volants d'inertie présentent des caractéristiques assez semblables à celles des supercondensateurs. Mais leur mise en œuvre est délicate et la sûreté de fonctionnement est une préoccupation. De plus, son domaine Énergie/Puissance est largement couvert par les caractéristiques de fonctionnement des supercondensateurs et accumulateurs électrochimiques (Figure 2.9).

3.2/ CHOIX DU/DES MOYENS DE STOCKAGE POUR NOTRE SYSTÈME HYBRIDE

Pour couvrir l'ensemble de l'énergie nécessaire durant le profil de mission le plus contraignant, le système hydrogène présente les meilleurs caractéristiques. Ce système nécessite un réservoir pour l'hydrogène et une pile à combustible. L'électrolyseur, permettant la production d'hydrogène à partir de l'électricité, peut être fixe, proche du parc habituel de l'hélicoptère. Un tel système est présenté sur de futurs aéronefs (Figure 2.5) [64]. L'objectif étant de s'intégrer sur l'existant et de minimiser la masse apportée, ce système de stockage ne pourra convenir.

Un pack de batteries stockant l'énergie électrique nécessaire est mis en place à bord de l'hélicoptère.

Parmi les différents types d'accumulateurs électrochimiques, les batteries lithium-ion polymère (LiPo) sont les plus performantes par rapport aux contraintes qu'il nous faut respecter (densité d'énergie, température, durée de vie, sécurité et rendement) (Figures 2.10(a), 2.11(a)).

Pour le système de stockage de l'énergie à puissance spécifique élevée, les supercondensateurs

sont un bon compromis Energie/Puissance et, sous forme de pack, pourront être hybridés avec notre pack de batteries (Figures 2.10(b), 2.11(b)).

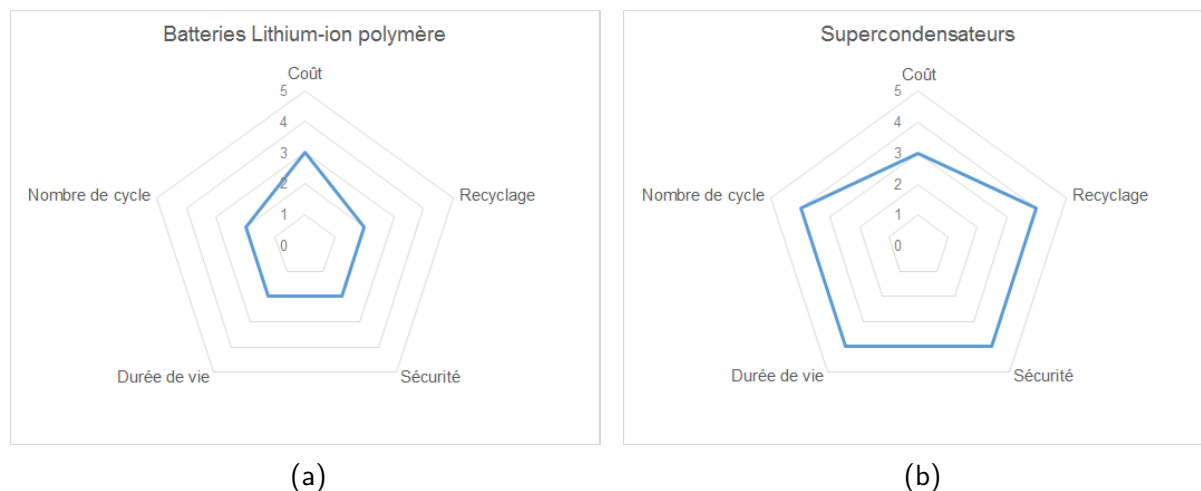


FIGURE 2.10 – Spécificités des sources de stockage d'énergie [25]

L'utilisation des deux composants de stockage se démocratise, leur coût est encore amené à décroître.

Le recyclage complet des batteries LiPo reste impossible. Des techniques peuvent prétendre à une efficacité de recyclage supérieure à 50% [75]. La durée de vie des supercondensateurs et l'absence de réaction chimique rendent leur recyclage moins problématique.

La batterie LiPo contient des produits inflammables. Une surcharge de celle-ci peut entraîner des risques d'incendie ou d'explosion.

La durée de vie d'un élément est liée au nombre de cycle pouvant être demandé au composant. Le nombre de cycle toléré par un supercondensateur est très supérieur au nombre de cycle toléré par une batterie LiPo [33].

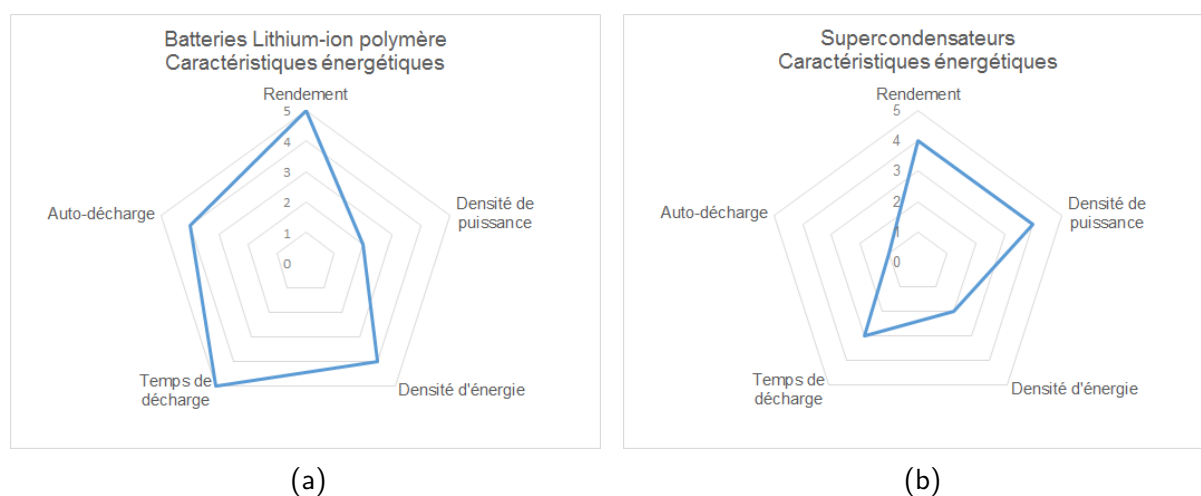


FIGURE 2.11 – Spécificités énergétiques des sources de stockage [68]

Le rendement est défini par le ratio d'énergie rendu lors de la décharge par rapport à l'énergie stockée [38].

4. ARCHITECTURE DE L'HÉLICOPTÈRE BIMOTEUR PROPOSÉ POUR LE PROJET 17

La densité de puissance spécifie le comportement dynamique de l'élément. Pour les supercondensateurs, la restitution de l'énergie se fait plus rapidement, sous forme électrostatique. Pour les batteries, par réaction chimique.

Les supercondensateurs sont considérés comme une source de puissance et une source d'énergie limitée. Leur temps de décharge est moindre que pour les batteries.

Les supercondensateurs sont sensibles à l'auto décharge [38].

Le diagramme de Ragone des éléments de stockage choisis montre la complémentarité entre le stockage de l'énergie d'un pack de batteries LiPo et la puissance pouvant être délivrée par notre pack de supercondensateurs (Figure 2.12) [85] .

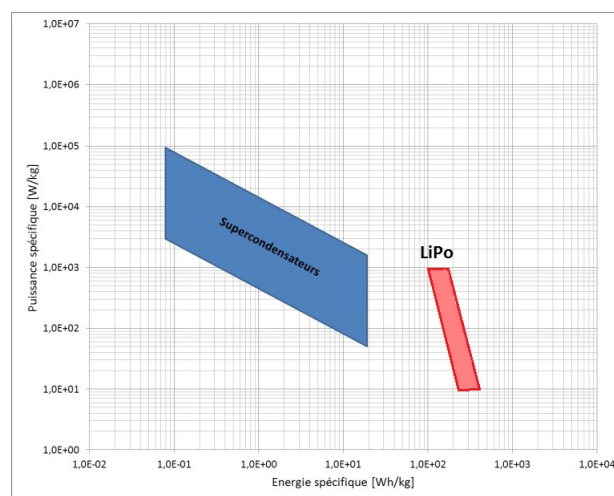


FIGURE 2.12 – Diagramme de Ragone des éléments de stockage sélectionnés [68]

Ainsi, il devient possible de proposer une nouvelle architecture électrique de l'hélicoptère bimotoeur étudié. Les sources de stockage électriques ne servent plus ponctuellement, mais participe à la fourniture électrique dans toutes les phases du vol. Elles sont alors connectées sur le bus de puissance, éventuellement par le biais d'un convertisseur DC/DC.

4/ ARCHITECTURE DE L'HÉLICOPTÈRE BIMOTEUR PROPOSÉ POUR LE PROJET

Comme vu précédemment, le choix des éléments de stockage s'est porté sur un pack de batteries LiPo pour répondre à la demande d'énergie, un pack de supercondensateur pour la partie puissance, un bus DC de 28V essentiellement destiné à l'électronique présente à bord et un bus DC de puissance de 1pu (1 per unit représente la valeur nominale du bus¹).

1. Le niveau de tension du bus est une donnée confidentielle issues de travaux antérieurs.

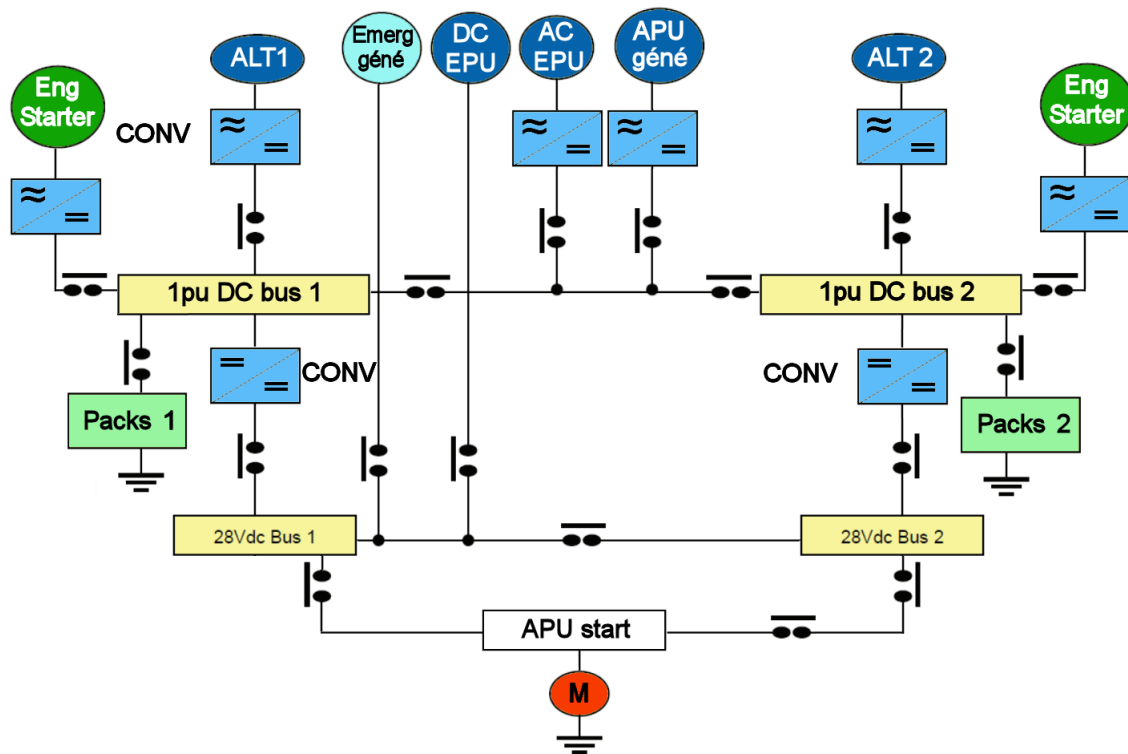


FIGURE 2.13 – Nouvelle architecture électrique proposée pour le projet

Les sources de stockage électriques ne sont plus utilisées ponctuellement. En conséquence, la connexion se fait sur le bus haute tension de 1pu 2.13.

Ces sources sont constituées d'un pack de batteries LiPo, d'un pack de supercondensateurs et du système permettant leur couplage au bus DC haute tension.

Afin de pouvoir mettre en équation les composants de stockage (batteries LiPo et supercondensateurs) de notre système sous Matlab et Malab-Simulink, nous devons trouvés, dans un premier temps, un modèle correspondant au fonctionnement du système prévu.

Remarque : Le cahier des charges imposent une tension continue de bus de 1pu. Ses valeurs de tension minimale et maximale ponctuelles, tolérables sont respectivement de 0,88pu et 1,02pu.

5/ MODÉLISATION DES ÉLÉMENTS DE STOCKAGE

Deux types de modèle de composant de stockage sont appliqués. Le premier est le modèle quasi-statique des batteries et des supercondensateurs destiné à la phase d'optimisation. Le second est un modèle dynamique permettant une analyse plus fine pour la validation du système trouvé.

5.1/ MODÉLISATION DE LA BATTERIE

5.1.1/ MODÈLE QUASI-STATIQUE

Le modèle quasi-statique est un modèle par circuit électrique équivalent composé d'une tension à vide (E_0) et d'une résistance interne en série (R_{bat}). Il est couramment utilisé dans la littérature [35] [42] [37] pour les études de gestion d'énergie. Une amélioration possible, considérée dans ce travail, est la variation des paramètres de la batterie en fonction de son état de charge et de la température (Figure 2.14).

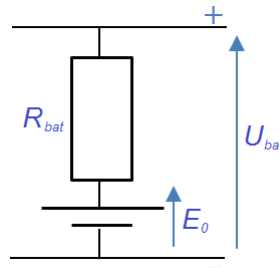


FIGURE 2.14 – Modèle quasi-statique de la batterie, avec $R_{bat} = f(T)$ et $E_0 = f(SOC, T)$ (T : température, SOC : état de charge)

5.1.2/ CARACTÉRISATION DU MODÈLE QUASI-STATIQUE

Le domaine à considérer est uniquement la décharge de la batterie (Chapitre 3 - Paragraphe 3). Un courant d'identification 2.15 des caractéristiques internes de la batterie est proposé dans les travaux de N.Devillers [68]. À partir de ce courant, la tension de sortie de la batterie est relevée (à 0°C, 20°C et 40°C).

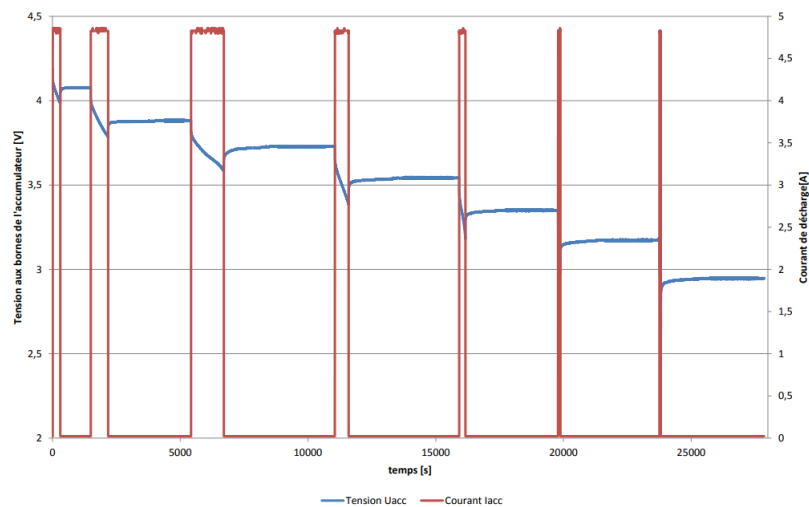


FIGURE 2.15 – Relevé de la tension et du courant de batterie - Décharge par palier à 20°C [68].

La batterie est initialement chargée ($SOC_0 = 1$). La durée du courant de décharge est connue.

Il est alors possible de connaître la capacité utile C_u restituée par la batterie :

$$SOC = 1 - \frac{C_u}{C_n} \quad (2.1)$$

Connaissant l'état de charge en fin de créneau de courant, la tension de la batterie est mesurée à ce moment. La tension à vide E_0 peut être déterminée en relevant la tension de la batterie après une période de d'équilibre (avant le prochain créneau de courant)(Figure 2.16). Il est alors possible d'en déduire la résistance interne R_{bat} (Figure 2.17).

$$R_{bat} = \frac{E_0 - U_{bat}}{I_{bat}} \quad (2.2)$$

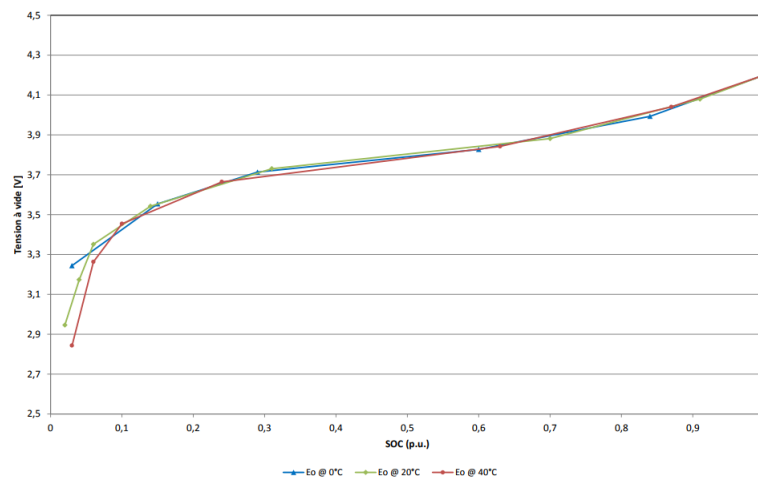


FIGURE 2.16 – Évolution de la tension à vide en fonction de l'état de charge

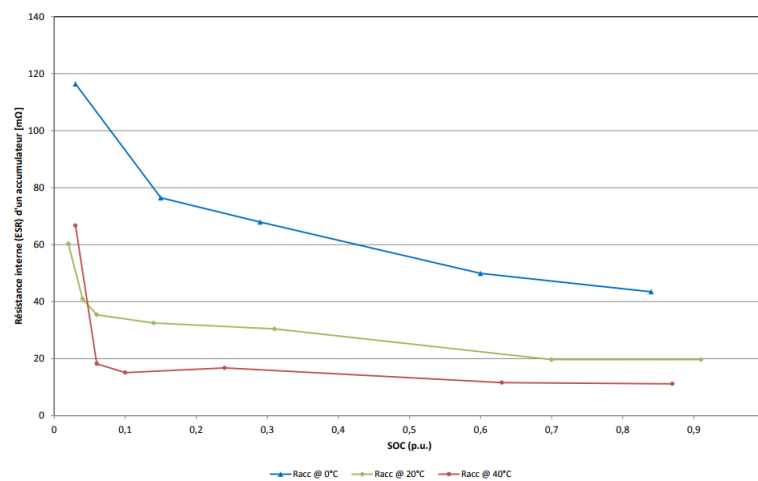


FIGURE 2.17 – Évolution de la résistance interne en fonction de l'état de charge

De ces valeurs de tension à vide et de résistances internes en fonction de la température et de l'état de charge, une approximation est réalisée [68].

Remarque : L'évolution de la résistance en fonction de l'état de charge entre 0,15 et 1 est relativement linéaire. Seul la température est alors prise en compte pour déterminer la résistance interne.

Les fonctions $R_{bat} = f(T)$ et $E_0 = f(SOC, T)$ sont déterminées :

$$R_{bat}(T) = R_{bat_{25C}} \times \left[(0,0009 \times T^2 + 0,078 \times T + 2,1827) \right] \quad (2.3)$$

, avec $R_{bat_{25}}$: valeur de la résistance R_{bat} à 25°C

$$E_0(T) = 3,154 + 3,945 \times SOC - 0,0053 \times T - 7,48 \times SOC^2 + 0,027 \times SOC \times T - 3,54e^{-5} \times T^2 + 4,63 \times SOC^3 - 0,023 \times SOC^2 \times T + 4,26e^{-5} \times SOC \times T^2 \quad (2.4)$$

5.1.3/ PERFORMANCES DU MODÈLE QUASI-STATIQUE

Un courant de validation ("US validation current" [87]) impose une durée de décharge, puis de relaxation, puis de diffusion à la batterie (respectivement décharge à courant constant ($I=1,9A$) durant vingt minutes, temps de repos ($I=0A$) durant deux heures et haute fréquence durant quarante minutes) (Figure 2.18). Un modèle de batterie quasi-statique intégrant les variations de la résistance et de la tension à vide en fonction de la température et de l'état de charge (Équation 2.3,2.4) est réalisé. La réponse en tension de notre modèle est alors comparée à la réponse en tension de la batterie expérimentale.

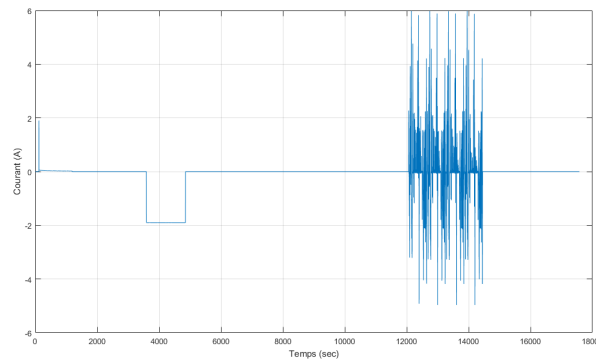


FIGURE 2.18 – Courant de validation des caractéristiques des modèles [87] (Modèle de batterie : IHR-1860, 1900mAh)

Sur les figures 2.19 (a) et (b), lors de la décharge, l'écart maximum entre la tension de sortie du modèle quasi-statique et celle mesurée est inférieure à 0,3V lors de la décharge, ce qui représente une erreur inférieure à 7%. La comparaison est également effectuée à basse température (0°C) et haute température (40°C) pour des erreurs du même ordre.

Pour réduire le temps de calcul de notre optimisation, cette représentation de la batterie LiPo peut être utilisée. Une validation du système trouvé est alors nécessaire en utilisant un modèle plus précis.

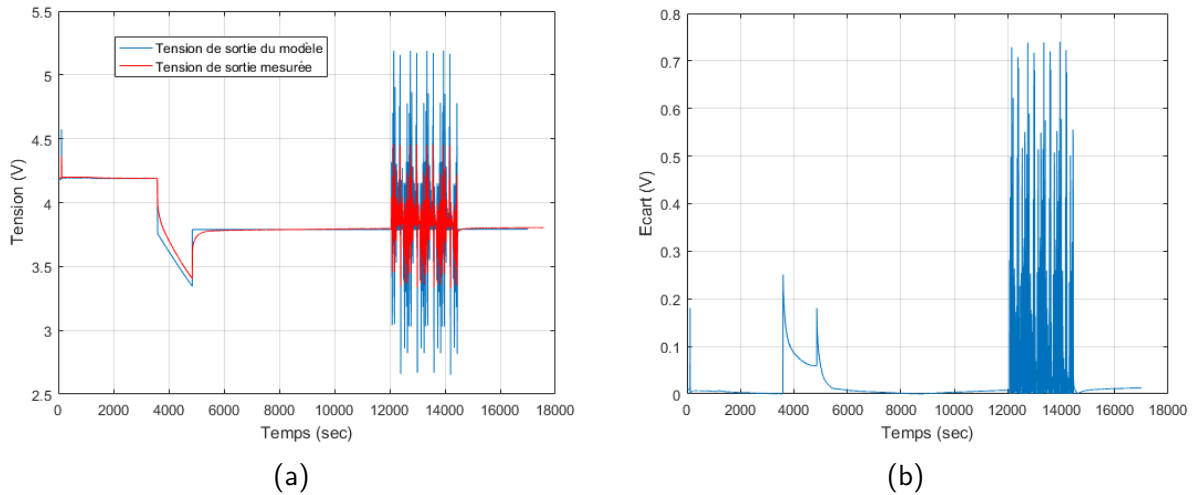


FIGURE 2.19 – Comparatif et écart entre tensions simulées et expérimentales à 20°C (Modèle de batterie : IHR-1860, 1900mAh)

5.1.4/ MODÈLE DYNAMIQUE

Le modèle dynamique est représenté par un circuit électrique qui reproduit le comportement de la batterie lors de la charge/décharge, de la diffusion et la relaxation.

Le modèle retenu (Figure 2.21) est basé sur la structure de Foster (Figure 2.20) [22].

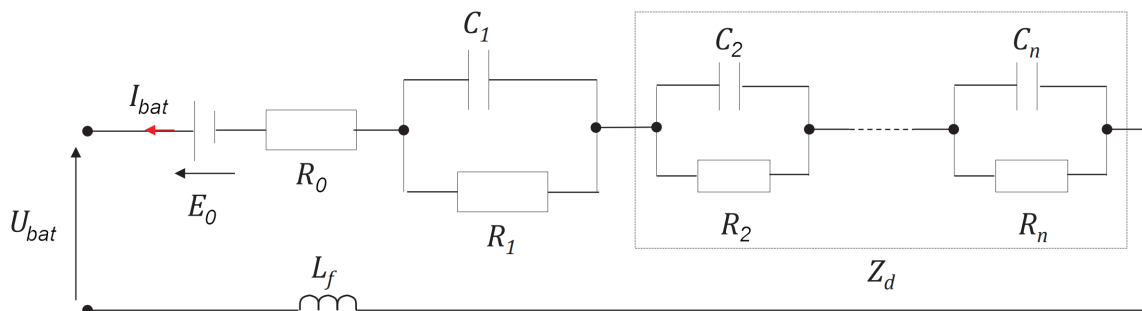


FIGURE 2.20 – Modèle de Foster de la batterie

Le bloc Z_d représente l'impédance de diffusion et l'inductance L_f , le comportement inductif de la batterie à hautes fréquences. Ces deux parties ne sont pas nécessaires pour valider le système trouvé, elles n'entrent pas en compte sur l'ensemble du profil de courant (Remarque du paragraphe 5.1).

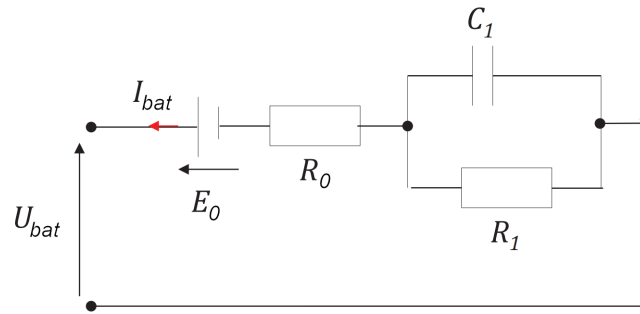


FIGURE 2.21 – Modèle dynamique retenu de la batterie

5.1.5/ CARACTÉRISATION ET PERFORMANCES DU MODÈLE DYNAMIQUE

La tension à vide E_0 , les résistances R_0 , R_1 et le condensateur C_1 sont fonction de la température et de l'état de charge.

Dans le manuscrit de thèse de N.Devillers, toutes les caractéristiques des modèles dynamiques de batteries ne sont pas déterminées. Le type batterie trouvé par optimisation devra être identifier et valider. Ces deux étapes sont détaillées dans Chapitre 5-Paragraphe 2.2, ainsi que les équations $E_0 = fct(T, SOC)$ 5.11, $R_0 = fct(T, SOC)$ 5.12, $R_1 = fct(T, SOC)$ 5.13 et $C_1 = fct(T, SOC)$ 5.14 trouvées par identification.

D'ores et déjà, le résultat de la validation du modèle dynamique (Figure 2.22 (a) et (b)) dont les caractéristiques sont connus peut être comparée avec la validation du modèle quasi-statique.

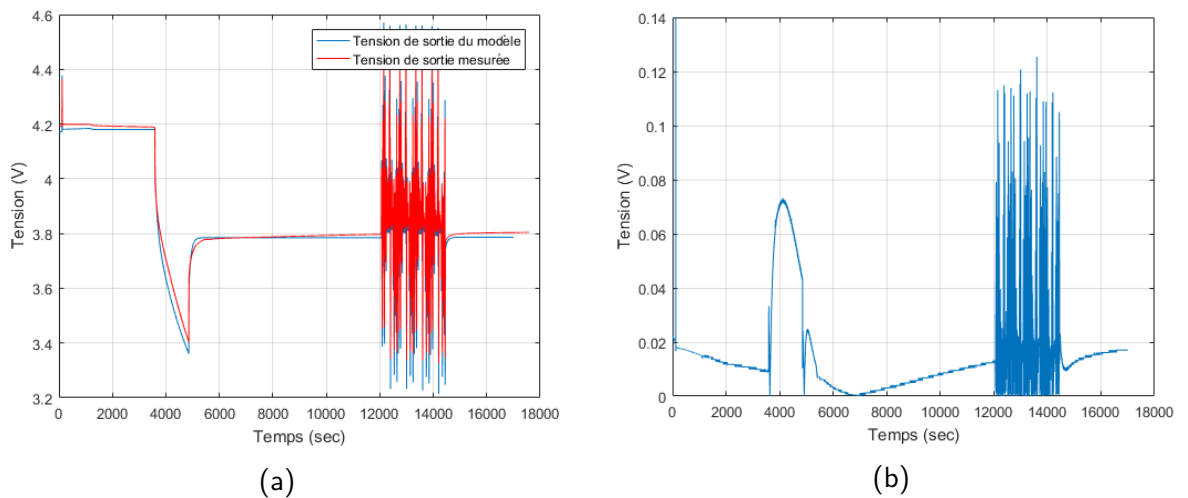


FIGURE 2.22 – Comparatif et écart entre tensions simulées et expérimentales (Modèle de batterie : IHR-1860, 1900mAh)

Sur les figures 2.22 (a) et (b), lors de la décharge, l'écart maximum entre la tension de sortie du modèle dynamique et celle mesurée est inférieure à 0,08V, ce qui représente une erreur inférieure à 2%.

La validation des systèmes trouvés à masse optimum peut être faite avec ce type de modèles.

5.2/ MODÉLISATION DU SUPERCONDENSATEUR

Cette partie détermine les modèles de supercondensateur à utiliser pour réaliser notre optimisation de masse et la vérification du système de stockage trouvé.

Les données "constructeur" indique une tolérance sur la capacité de 0% à +20%. Les mesures et caractéristiques exploitées dans ce paragraphe sont issues du travail effectué en [68] et peuvent donc être différentes pour un autre supercondensateur de même référence (Maxwell 1200F).

5.2.1/ MODÈLE QUASI-STATIQUE

Il s'agit d'un modèle simple par circuit électrique composé d'une résistance et d'une capacité en série (Figure 2.23). Ce modèle est couramment utilisé pour l'étude de systèmes énergétiques [30] [53].

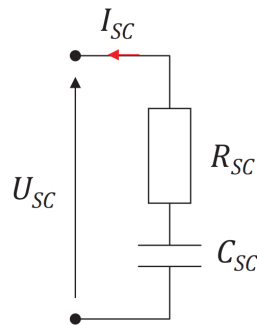


FIGURE 2.23 – Modèle quasi-statique du supercondensateur

L'incidence de la température sur le fonctionnement du supercondensateur est très faible. Toutefois, cette contrainte est également prise en compte sur nos modèles.

On a : $R_{sc} = f(T)$ (T : température)

$$R_{sc}(T) = R_{sc_{25C}} \times \left[(0,009 \times T^2 - 0,0097 \times T + 1,1567) \right] \quad (2.5)$$

, avec $R_{sc_{25}}$: valeur de la résistance R_{sc} à 25°C

La simulation du modèle quasi-statique du supercondensateur est réalisée sous Matlab-Simulink et est comparée avec les valeurs trouvées lors de l'expérimentation.

5.2.2/ CARACTÉRISATION DU MODÈLE QUASI-STATIQUE

Les constructeurs utilisent la similitude entre le comportement des condensateurs et les supercondensateurs pour effectuer la caractérisation. Un essai de décharge à courant constant permet de déterminer les deux paramètres du modèle quasi-statique (R_{sc} et C_{sc}). En appliquant ce courant constant, l'évolution de la tension de sortie du supercondensateur est relevée (Figure 2.24).

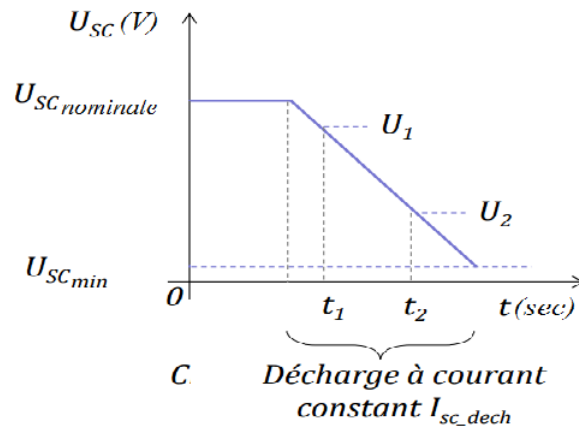


FIGURE 2.24 – Allure de la tension de sortie du supercondensateur lors d'une décharge à courant constant

L'identification de la capacité du supercondensateur C_{SC} est faite lors de la décharge en vérifiant l'évolution de la tension par rapport au temps :

$$I_{SC} = C_{SC_{dech}} \frac{dU_{SC}}{dt}$$

$$\Rightarrow C_{SC} = I_{SC_{dech}} \times \frac{t_2 - t_1}{U_1 - U_2} \quad (2.6)$$

La résistance interne R_{SC} est calculée à partir de la chute de tension obtenue au moment d'appliquer le courant de décharge (Figure 2.25) :

$$R_{SC} = \frac{\Delta U_{ESR}}{I_{SC_{dech}}} \quad (2.7)$$

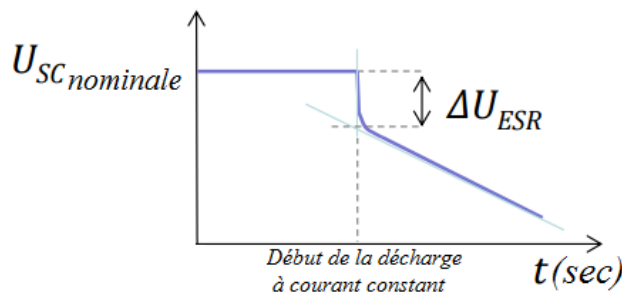


FIGURE 2.25 – Identification de la résistance interne du modèle quasi-statique - Zoom sur le début de la décharge à courant constant

Sur les figures 2.26 (a) et (b), lors de la décharge à courant constant, l'écart maximum entre la tension de sortie du modèle quasi-statique et celle mesurée est inférieur à 0,16V, soit une erreur en pourcentage de moins de 6%.

La tension en sortie de modèle est légèrement inférieure à la mesure. Ainsi, le modèle quasi-statique est un peu plus pénalisant qu'en réalité. Pour réduire le temps de calcul de notre

optimisation cette représentation du supercondensateur est utilisée. Une validation du système trouvé est réalisée à l'aide d'un modèle plus précis.

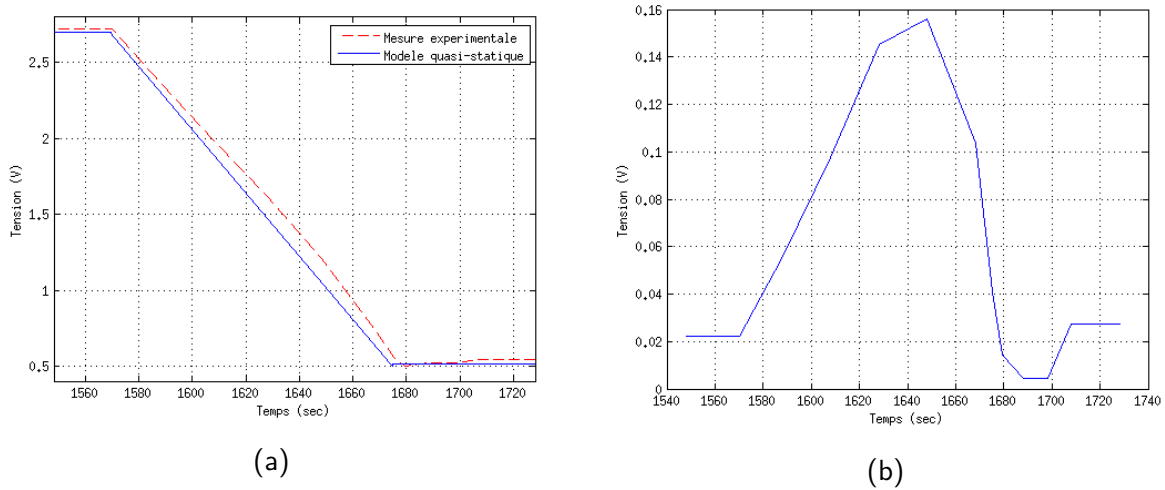


FIGURE 2.26 – Comparatif et écart entre tensions simulées et expérimentales

5.2.3/ MODÈLE DYNAMIQUE

Le modèle dynamique du supercondensateur choisi est issu du modèle de Zubieta et Bonert [14]. Il s'agit d'un modèle par circuit équivalent, composé de trois circuits R-C en parallèle ayant chacun une base de temps différente (Figure 2.27). Ainsi, les différents phénomènes observables lors du fonctionnement du supercondensateur peuvent être simulés.

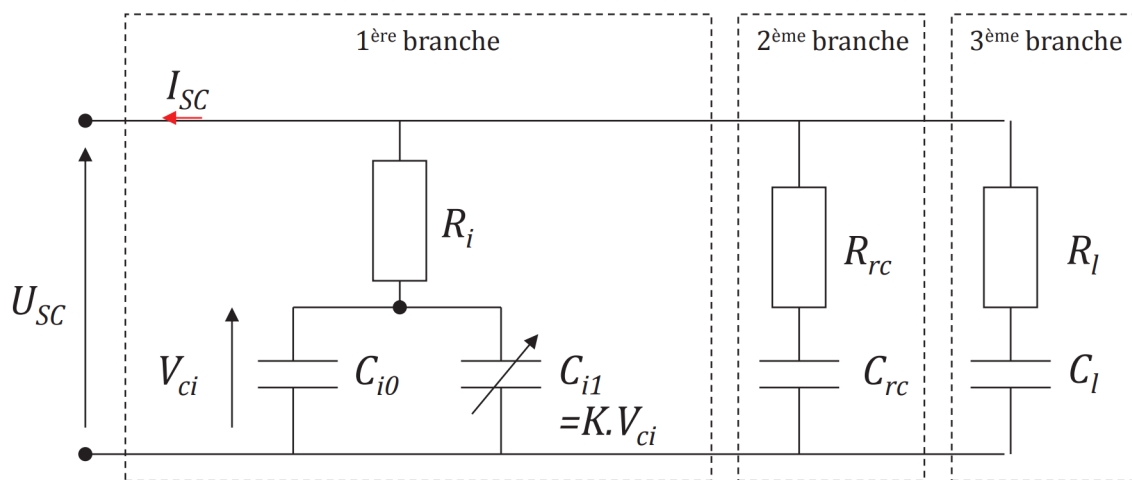


FIGURE 2.27 – Modèle de Zubieta-Bonert du supercondensateur [14]

La première branche représente la charge/décharge du supercondensateur. Sa constante de temps est de l'ordre de la seconde.

La deuxième, le phénomène de redistribution des charges après une période de charge ou de décharge. Sa constante de temps est de l'ordre de la minute.

Enfin, la dernière représente le phénomène d'auto-décharge lorsque le supercondensateur est laissé au repos. Sa constante de temps est de l'ordre de plusieurs minutes, voire de l'heure. Cette dernière n'est pas considérée durant le profil de courant étudié et est supprimée de notre modèle dynamique (Figure 2.28).

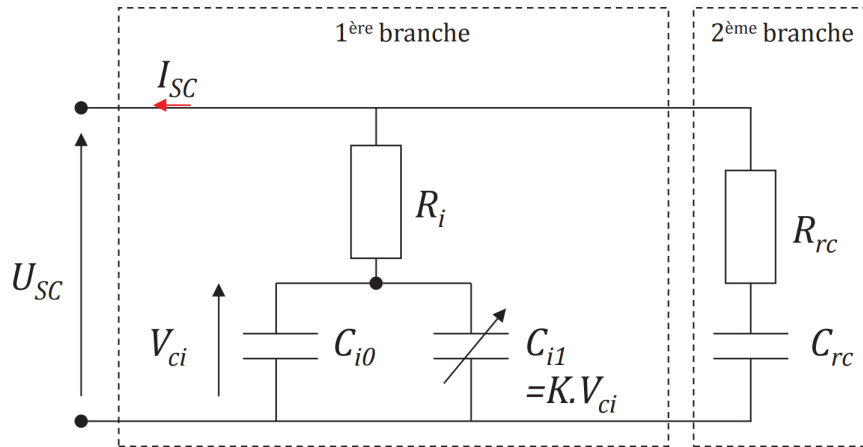


FIGURE 2.28 – Schéma simplifié issu du modèle de Zubieta-Bonert

La simulation du modèle dynamique du supercondensateur est réalisée sous Matlab-Simulink et est comparée avec les valeurs trouvées lors de l'expérimentation.

5.2.4/ PERFORMANCES DU MODÈLE DYNAMIQUE

Sur les figures 2.29 (a) et (b), la tension de sortie de notre modèle suit davantage la tension réelle mesurée. L'écart maximum en tension durant la décharge du supercondensateur est de l'ordre de 0,06V ce qui représente une erreur de moins de 2%. Ce résultat est du même ordre de grandeur que pour les batteries. Il s'agit d'un modèle pouvant servir à la validation de notre système trouvé par optimisation.

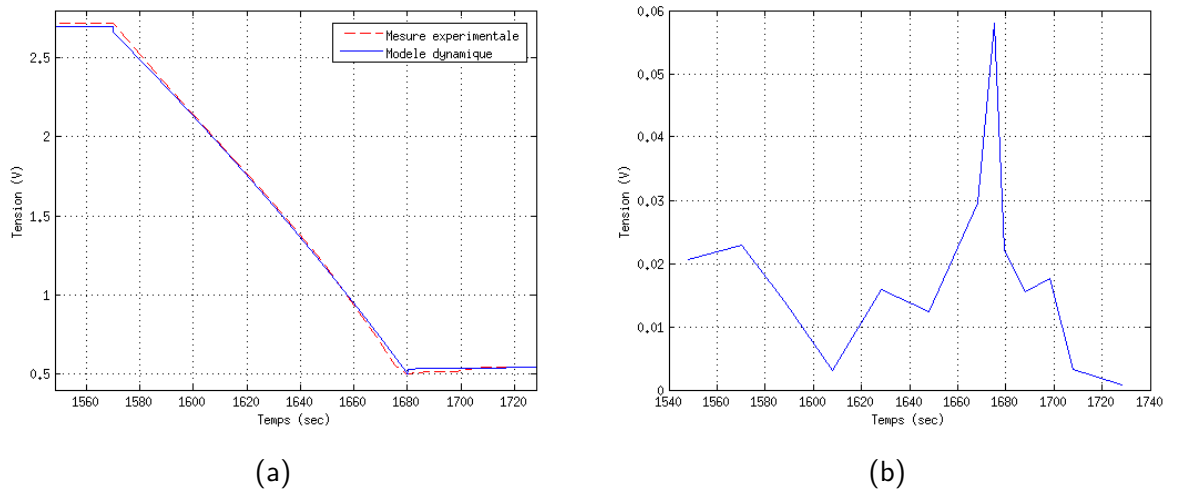


FIGURE 2.29 – Comparatif et écart entre tensions simulées et expérimentales

6/ ASSEMBLAGE EN SÉRIE ET EN PARALLÈLE DES MODÈLES

Hypothèse faite sur les modèles quasi-statiques :

Dans un premier temps, pour une même référence de composants, leurs caractéristiques internes sont considérées identiques. C'est à dire, tous les éléments des packs de batteries (ou de supercondensateurs) ont exactement les mêmes valeurs de caractéristiques (pour les batteries : même résistance interne et tension à vide, pour les supercondensateurs : même résistance interne et capacité).

6.1/ ASSEMBLAGE EN SÉRIE ET EN PARALLÈLE DES MODÈLES QUASI-STATIQUES

- Le modèle d'un pack de batteries est établi comme suit (Figure 2.30) avec NS_{bat} et NP_{bat} respectivement représentant le nombre de cellules en série et en parallèle.

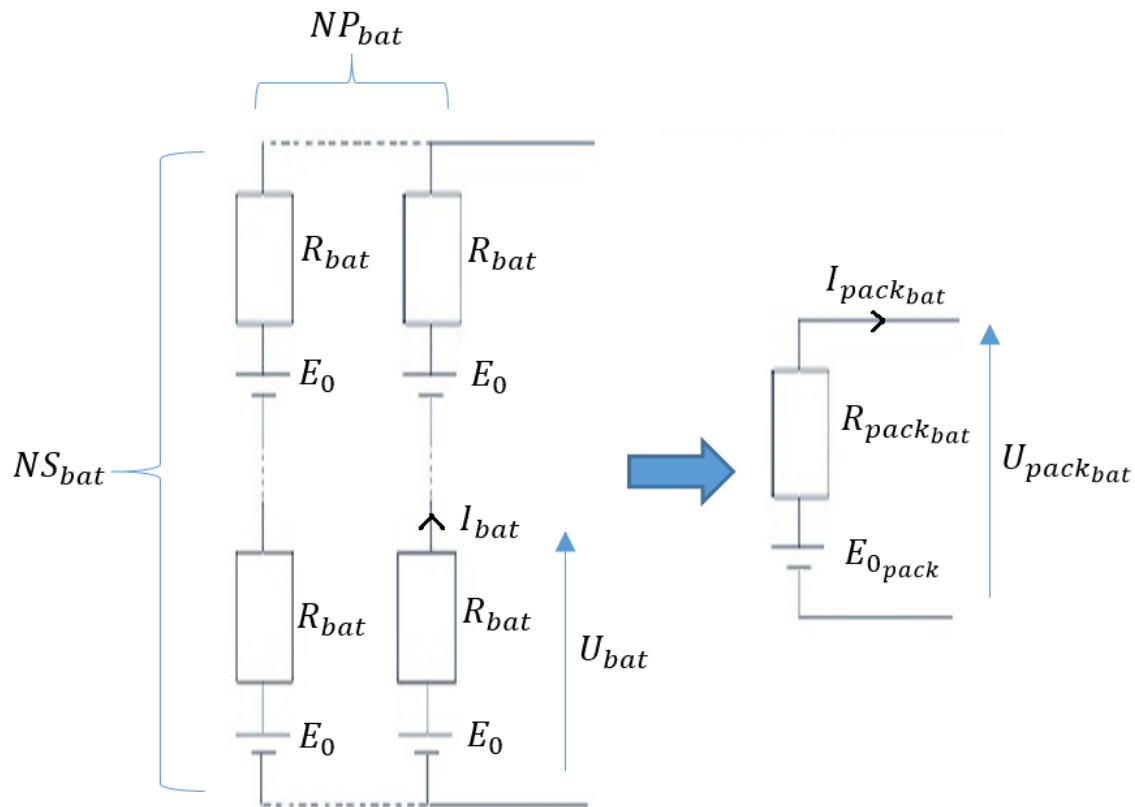


FIGURE 2.30 – Modèle d'un pack de batteries

La résistance interne équivalente, la tension à vide du pack de batteries sont égales à :

$$R_{pack_{bat}} = \frac{NS_{bat} \times R_{bat}}{NP_{bat}} \quad (2.8)$$

$$E_{0_{pack}} = NS_{bat} \times E_0 \quad (2.9)$$

On a également :

$$C_{pack_{bat}} = NP_{bat} \times C_{bat} \quad (2.10)$$

$$I_{pack_{bat}} = NP_{bat} \times I_{bat} \quad (2.11)$$

$$U_{pack_{bat}} = NS_{bat} \times U_{bat} \quad (2.12)$$

$$N_{bat} = NS_{bat} \times NP_{bat} \quad (2.13)$$

avec N_{bat} : nombre de cellules

L'énergie stockée et la puissance disponible du pack de batteries sont exprimées en fonction du nombre de cellules présentes :

$$W_{pack_{bat}} = N_{bat} \times W_{bat} \quad (2.14)$$

$$P_{pack_{bat}} = N_{bat} \times P_{bat} \quad (2.15)$$

- Le modèle d'un pack de supercondensateurs est établi comme suit (Figure 2.31) avec NS_{sc} et NP_{sc} respectivement représentant le nombre de cellules en série et en parallèle.

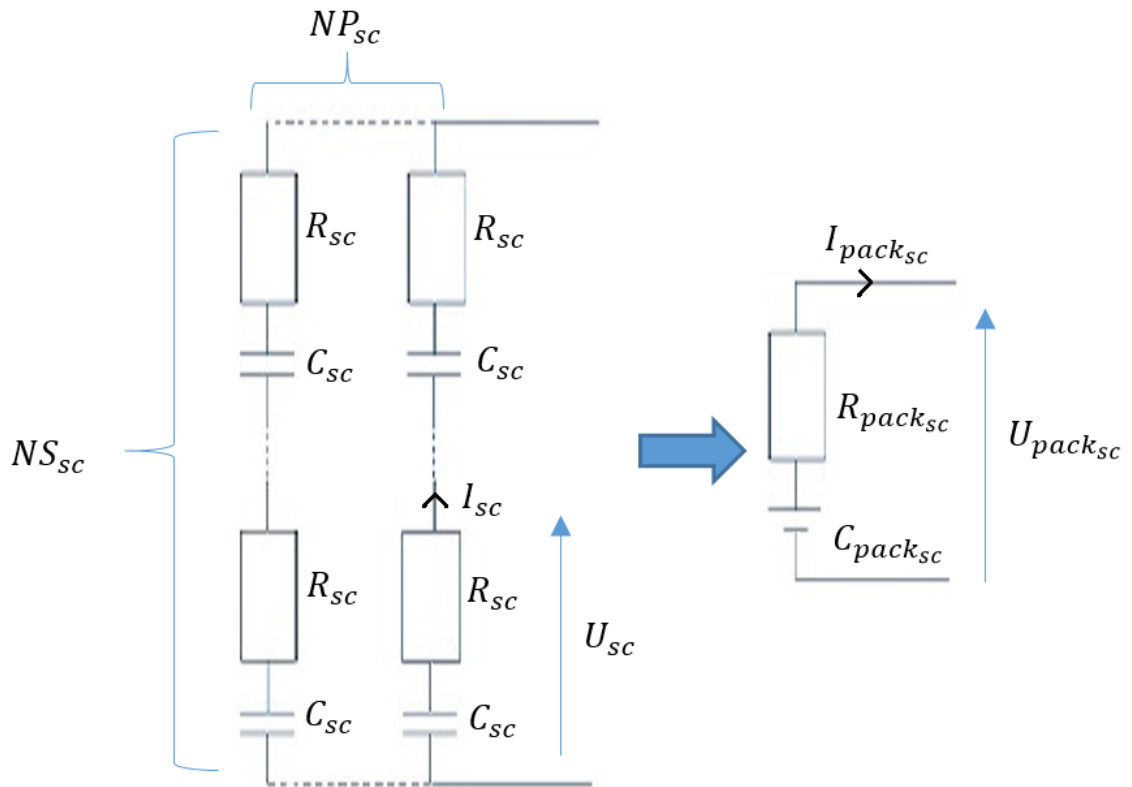


FIGURE 2.31 – Modèle d'un pack de supercondensateurs

La résistance interne équivalente, la capacité équivalente du pack de supercondensateurs sont égales à :

$$R_{pack_{sc}} = \frac{NS_{sc} \times R_{sc}}{NP_{sc}} \quad (2.16)$$

$$C_{pack_{sc}} = \frac{NP_{sc} \times C_{sc}}{NS_{sc}} \quad (2.17)$$

On a également :

$$U_{pack_{sc}} = N S_{sc} \times U_{sc} \quad (2.18)$$

$$I_{pack_{sc}} = N P_{sc} \times I_{sc} \quad (2.19)$$

$$N_{sc} = N S_{sc} \times N P_{sc} \quad (2.20)$$

avec N_{sc} : nombre de cellules

L'énergie stockée et la puissance disponible du pack de supercondensateurs sont exprimées en fonction du nombre de cellules présentes :

$$W_{pack_{sc}} = N_{sc} \times W_{sc} \quad (2.21)$$

$$P_{pack_{sc}} = N_{sc} \times P_{sc} \quad (2.22)$$

6.2/ ASSEMBLAGE EN SÉRIE ET EN PARALLÈLE DES MODÈLES DYNAMIQUES

Le fait d'avoir exactement les mêmes caractéristiques pour chaque cellule de pack simplifie le calcul et donc réduit le temps de recherche de la masse minimale de notre système hybride. Mais, ceci ne reflète pas la réalité. Les cellules de même référence dans un pack n'ont pas exactement les mêmes caractéristiques. La tolérance sur la capacité des batteries lithium-ion vendues est de -0%/+10% et sur la capacité des supercondensateurs de -0%/20%. Les valeurs de résistances internes annoncées sont également approximatives ($\pm 15\%$) [78] [45], [49], [50].

Ainsi, lors de la validation du système trouvé, les packs de modèles dynamiques disposent de composants uniques. Il est attribué un coefficient aléatoire à chaque cellule respectant la tolérance constructeur, pour déterminer sa caractéristique réelle (Figures 2.32 et 2.33).

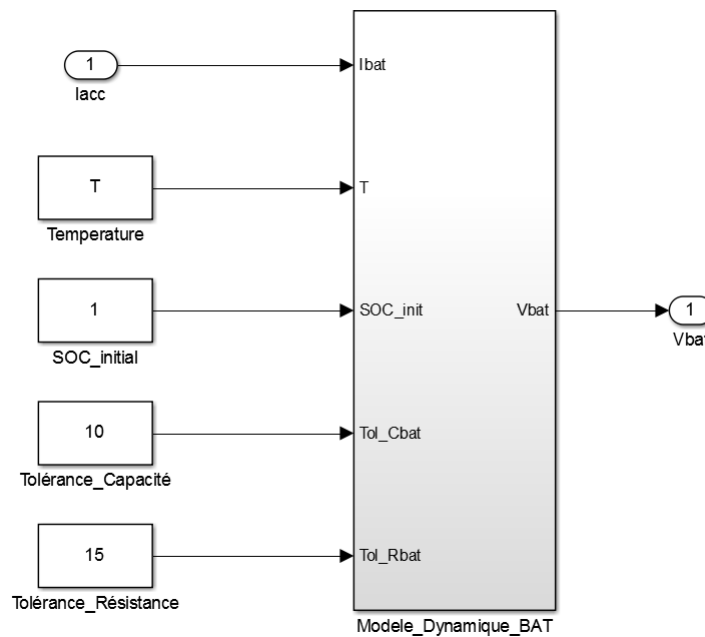


FIGURE 2.32 – Schéma Simulink du modèle dynamique de batteries avec les tolérances constructeur

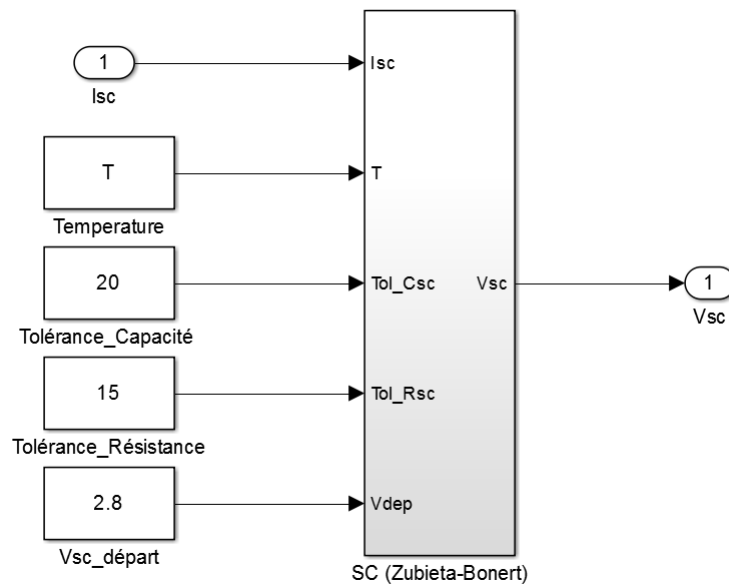


FIGURE 2.33 – Schéma Simulink du modèle dynamique de supercondensateurs avec les tolérances constructeur

Les modèles dynamiques des composants sont utilisés (Figures 2.21 2.28) sous forme de sous-système (Blocs "Modèle_Dynamique_Bat" de la figure 2.32 et "SC (Zubieta-Bonert)" de la figure 2.33).

6.2.1/ APPLICATION DE LA TOLÉRANCE "CONSTRUCTEUR" AUX MODÈLES DYNAMIQUES

- Avant de déterminer la capacité et les résistances internes de la batterie en fonction de la température et de l'état de charge (Figure 2.21), on applique à ces dernières un coefficient aléatoire respectant la tolérance fixée par le constructeur (tolérance, respectivement : -0%+10% et $\pm 15\%$).
- Pour le modèle dynamique de supercondensateur (Figure 2.28), la tolérance "constructeur" (tolérance : -0%+20%) sur la capacité C_{i0} du modèle de Zubieta-Bonert.

6.2.2/ ASSOCIATION EN SÉRIE DES CELLULES

Les différents blocs Simulink ainsi individualisés (Paragraphe 6.2.1) simulant le fonctionnement d'une batterie ou d'un supercondensateur sont assemblés en série en additionnant chacune de leur tension de sortie (Figures 2.34 et 2.35). La somme de ces tensions représente la tension de sortie du pack.

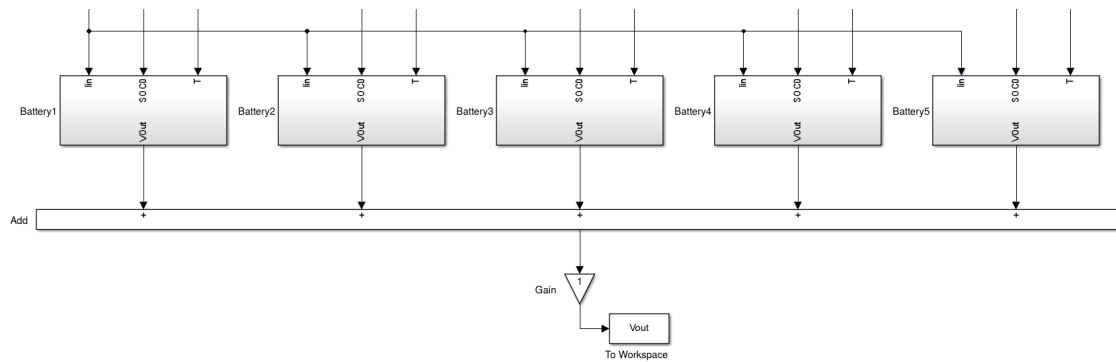


FIGURE 2.34 – Assemblage série de cinq batteries

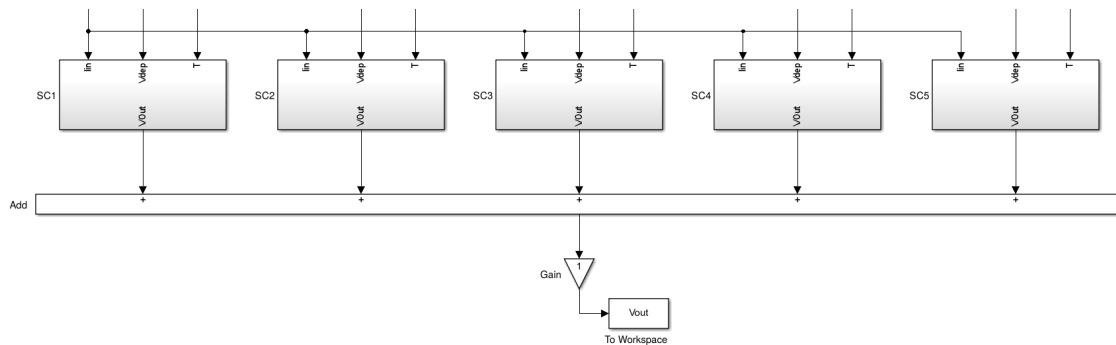


FIGURE 2.35 – Assemblage série de cinq supercondensateurs

Sous Matlab, sous forme de script (Figures 2.34 2.35) :

- les blocs de cellule sont copiés autant de fois qu'il y a de composants en série dans le pack à étudier (NS_{bat} ou NS_{sc}) (instruction "add_block").
- le bloc Simulink "Add" est configuré avec NS_{bat} ou NS_{sc} entrées (instruction "set_param").
- Pour additionner les tensions de sortie des différents blocs cellule, leurs sorties "Vout" sont reliées aux entrées du bloc "Add". Les bornes "lin" des courants demandés aux composants sont reliées entre elles (instruction "add_line").

6.2.3/ ASSOCIATION EN PARALLÈLE DES BRANCHES DE CELLULES

La tension de sortie de chaque bloc "cellule" est fonction du courant qui leur est demandé. C'est le courant demandé au pack, le nombre de branches à assembler en parallèle et les tolérances appliquées à chaque cellule qui déterminent le courant à attribuer à chaque branche du pack.

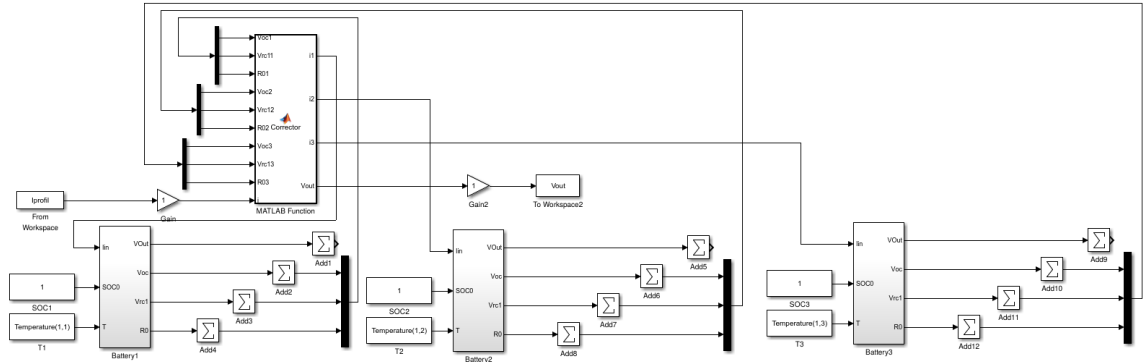


FIGURE 2.36 – Assemblage en parallèle de trois batteries

Le bloc "Matlab Function" permet de répartir les différents courants sur chaque branche du pack en fonction des caractéristiques spécifiques des batteries le composant. Pour cela, il est nécessaire de connaître les sommes des tensions à vide E_0 , des tensions aux bornes du circuit R_1/C_1 et des résistances R_0 (Figure 2.21) de chaque branche du pack.

Sous Matlab, sous forme de script (Figure 2.36, pour la première branche du pack :

- les blocs Simulink "Add2" à "Add4" sont configurés avec NS_{bat} entrées (instruction "set_param").

Remarque : la configuration pour le bloc Simulink "Add1" est effectuée lors de l'association en série.

- Les différentes sorties de chaque cellule de la branche sont connectées à leur bloc Simulink "Add" respectif pour définir les sommes des tensions à vide, des tensions aux bornes des condensateurs C_1 et des résistances R_0 . L'entrée ("in") des cellules est connectée à la sortie du bloc "Matlab Function" correspondant au numéro de leur branche (instruction "add_line").

Le script Matlab effectue ces opérations pour chaque branche en parallèle dans le pack (NP_{bat}).

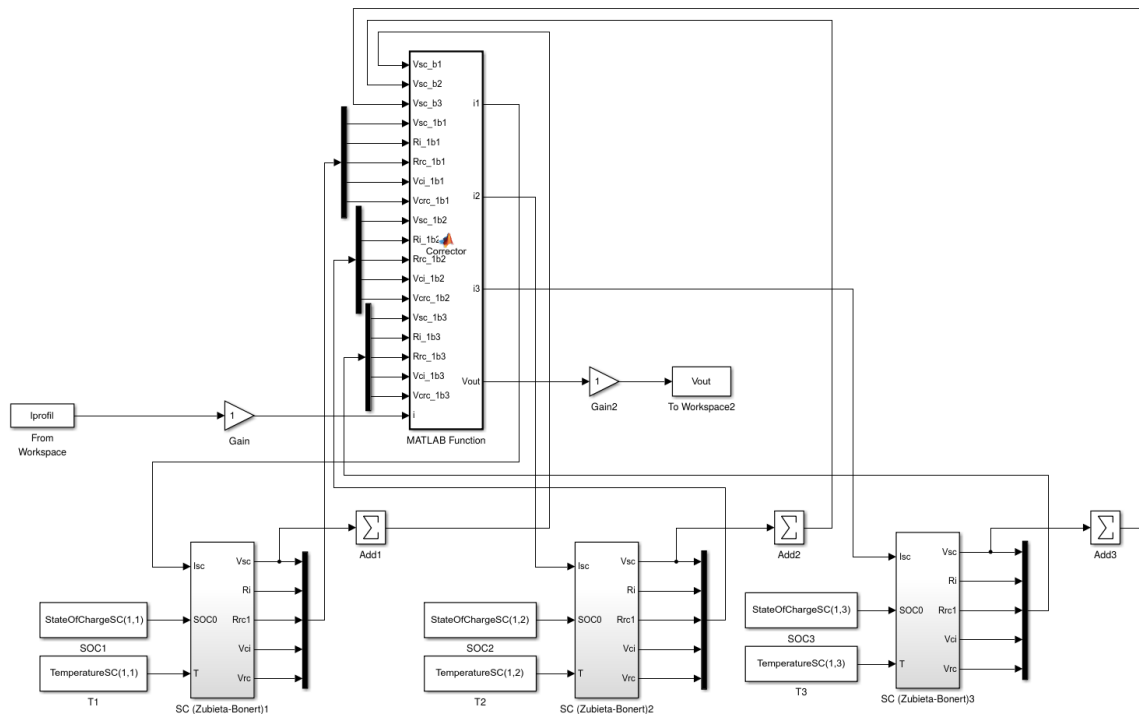


FIGURE 2.37 – Assemblage en parallèle de trois supercondensateurs - Travail réalisé en partie par Lucas Ligocki Candemil, stagiaire au sein du laboratoire Femto-st du 29 mars au 20 mai 2016, en dernière année de licence ingénierie électrique à l'UFRSTGI Louis Néel de Belfort [102].

Le bloc "Matlab Function" permet de répartir les différents courants sur chaque branche du pack en fonction des caractéristiques spécifiques des supercondensateurs le composant. Pour cela, il est nécessaire de connaître la somme des tensions de sortie V_{sc} de chaque branche du pack. Mais également, les valeurs des résistances R_i , R_{rc} et des tensions aux bornes des condensateurs V_{ci} , V_{cr} de la première cellule de chaque branche.

Sous Matlab, sous forme de script (Figure 2.37, pour la première branche du pack :

- le bloc Simulink "Add1" est configuré avec NS_{sc} entrées (instruction "set_param") (déjà effectué lors de l'association en série).
- Les différentes sorties de chaque cellule de la branche sont connectées à leur bloc Simulink "Add" respectif pour définir les sommes des tensions à vide, des tensions aux bornes des condensateurs C_1 et des résistances R_0 . L'entrée ("lin") des cellules de la branche est connectée à la sortie du bloc "Matlab Function" correspondante définissant le courant demandé (instruction "add_line").

Le script Matlab effectue ces opérations pour chaque branche en parallèle dans le pack (NP_{sc}).

7/ CONCLUSION DE L'ÉTAT DE L'ART : STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES AÉRONEFS

L'aéronef "plus électrique" permet de réduire la masse à embarquer, les émissions et la consommation de carburant. Avec les nouvelles possibilités offertes par les progrès faits en électronique de puissance et sur le stockage de l'énergie électrique, il est envisageable, non plus, de se contenter de s'en servir comme système énergétique de secours, mais également de remplacer d'autres types de source embarquée.

En premier lieu, il se pose la question d'utiliser un bus à tension alternative (bus AC) ou à tension continue (bus DC).

La majorité des charges de l'aéronef fonctionne sous courant alternatif, seul l'alimentation de l'électronique est à courant continu. À bord, la tendance est à l'utilisation de bus de tension AC à amplitude constante et à fréquence variable. Les quelques avions du futur décrits, disposent de bus continu (bus DC) et de nouvelles sources embarquées comme des piles à combustible avec leur réservoir.

La littérature admet, à système équivalent, moins de pertes en utilisant un bus DC par rapport à un bus AC.

Mais encore, il est nécessaire de disposer de systèmes de stockage autonome, capable de restituer les besoins en énergie et en puissance.

Actuellement, seule une hybridation électrique peut être envisagée pour répondre à la demande. Un pack de batteries LiPo permet de restituer l'énergie nécessaire et un pack de supercondensateurs la puissance.

Les modèles des composants choisis sont, soit quasi-statiques, soit dynamiques. Lors de notre optimisation de la masse du système, le modèle quasi-statique avec des caractéristiques identiques pour chaque cellule est pris en compte dans le pack. Ceci permet de réduire considérablement le temps de recherche d'une solution, mais nécessite une validation avec les modèles dynamiques par rapport au profil de courant le plus contraignant en énergie et en puissance.

Chaque cellule des modèles dynamiques est caractérisée individuellement grâce aux tolérances appliquées par les constructeurs.

La simulation de fonctionnement des différents packs avec les modèles quasi-statiques ou les modèles dynamiques en série et en parallèle, est réalisée sous Matlab/Simulink.

ARCHITECTURES HYBRIDES EXISTANTES

Aucun élément de stockage électrique n'atteint des indices suffisamment importants pour répondre aux différents critères énoncés (Spécificités énergétiques - Chapitre 2 Paragraphe 3). Il s'avère nécessaire de combiner au moins deux types de composants de stockage.

Notre système va devoir répondre à une brusque demande de courant tout en maintenant la tension du bus stable. Les pics de puissance demandée sont alors importants. Mais également, l'énergie stockée doit être suffisante pour être capable d'en fournir durant tout le profil de mission.

Ces demandes énergie/puissance sont telles que plusieurs éléments de stockage de même type doivent être associés en série et en parallèle pour constituer des packs. Un pack répond à la demande en énergie, l'autre à la demande en puissance.

Ce chapitre décrit les possibilités d'association des éléments de stockage d'énergie électrique sélectionnés préalablement. Dans la littérature, différentes architectures sont référencées. Mais également, la manière dont les différents types de demande de la charge sont réparties entre les éléments de stockage.

Ainsi, une première caractérisation de pack peut être définie avec un nombre minimum de composants constituant le pack, une valeur maximum de cellules en série, une valeur minimale de cellules en parallèle.

1/ POSITIONNEMENT DES TRAVAUX

Le profil de charge de certaines applications demande une combinaison de caractéristiques diverses telles que la quantité d'énergie à fournir, pour des impulsions de puissance élevées, le coût et la durée de vie. Actuellement, ces caractéristiques sont très contraignantes pour un seul type de composant de stockage électrique. Pour mettre en œuvre de telles applications, des dispositifs hybrides de stockage d'énergie sont proposés, notamment pour une utilisation comme source embarquée [28] [100] [34] [36].

La mise en œuvre de notre système nécessite une combinaison de deux composants dont les caractéristiques répondent à différents types de demande du bus DC. Pour les les références

des articles citées ci-dessus, les systèmes utilisés combinent tous un pack de batteries couplé à un pack de supercondensateurs. Effectivement, il apparaît que les deux types de composants sont complémentaires sur leur manière de restituer l'énergie stockée (Chapitre 2).

Le pack de batteries sert de dispositif à haute énergie (réponse lente au profil de mission), ce que ne peut faire un pack de supercondensateurs sur la durée. Celui-ci contribue à répondre aux demandes de puissance élevée (réponse rapide au profil de mission).

La solution en connexion directe des sources de stockage sur le bus DC est envisageable. La tension du bus est alors fonction de la décharge des composants du/des packs. Un convertisseur DC/DC permet un contrôle et le maintien à une valeur de tension de bus constante.

Également, cela demande un nombre important de composants de stockage à embarquer. En effet, la tension nominale du bus impose un nombre minimum de ces composants en série. De plus, si cette branche de cellules n'est pas suffisante pour supporter le courant maximum demandé, au moins une autre avec autant de composants en série sera nécessaire.

Pour éviter ce surdimensionnement du pack et donc puiser davantage dans les ressources en énergie du composant, un convertisseur Boost DC/DC permet d'augmenter la valeur de tension de sortie du pack et ainsi d'en limiter le nombre de cellule en série.

Ainsi, pour certaines architectures, la demande de puissance provenant du bus DC peut être répartie en fonction de son type (impulsion ou constante) vers tel ou tel pack. Ceci permet d'assurer un fonctionnement optimum des composants des packs. Dans notre cas, les impulsions de puissance sont dirigées vers le pack de supercondensateurs et le régime permanent vers le pack de batteries.

Pour combiner deux ou plusieurs dispositifs de stockage d'énergie comme une seule source d'alimentation, de nombreuses topologies sont proposées qui diffèrent selon le mode de connexion à un bus continu. Tous ces dispositifs proposés peuvent être regroupés en trois catégories [54], [39] (Figures 3.1(a),(b) : solutions à un convertisseur - Figure 3.1(c) : solution à deux convertisseurs).

L'objectif est de rechercher les avantages et inconvénients spécifiques à notre système embarqué sur aéronef de ces architectures.

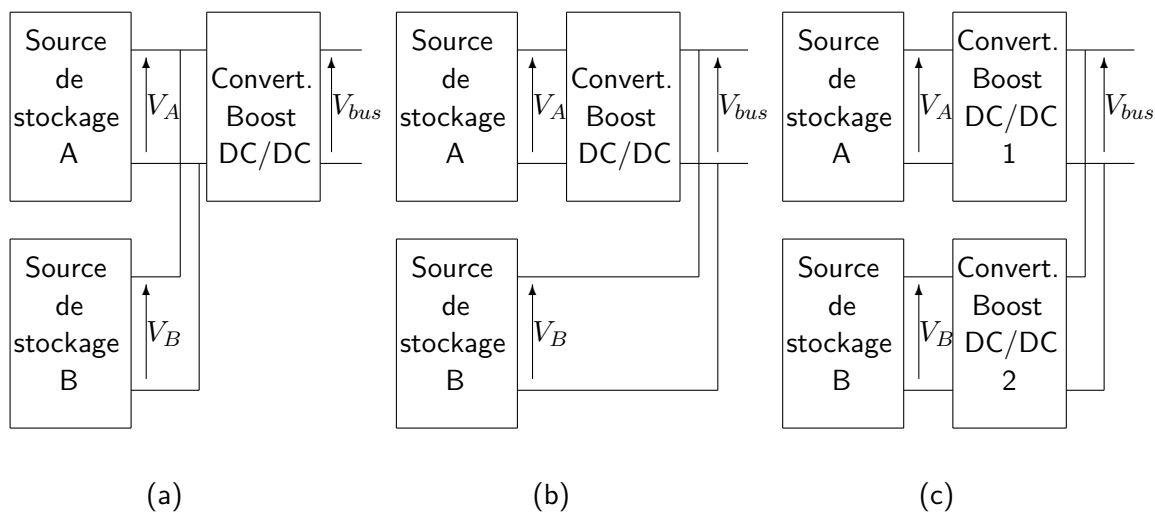


FIGURE 3.1 – Architectures électriques embarquées standards

Le choix de l'architecture dépend de critères propre à ce que l'utilisateur souhaite. Un compromis sur la masse, le coût, la fiabilité et la qualité de tension, est nécessaire. Un nombre important de convertisseurs apporte une meilleure qualité de fourniture électrique car on dispose davantage de variables de contrôle, mais aura une influence sur la masse et le coût. Les critères sur la fiabilité sont plus nuancés. Le fait d'avoir plus de composants permet davantage de contrôle donc de possibilités de réponse à une demande spécifique mais augmente les chances de pannes.

- La figure 3.1(a) montre une connexion parallèle directe de deux dispositifs de stockage d'énergie. Cette topologie nécessite que les tensions de sortie des deux sources soient égales ($V_A = V_B$).

Dans notre cas, lors d'un pic de courant, la chute de tension aux bornes de ce système est plus faible qu'avec des batteries seules.

Du fait de la différence de valeur d'impédance interne des deux types de composants (beaucoup plus importante pour les batteries), pendant les demandes ponctuelles de puissance, les supercondensateurs délivrent l'énergie nécessaire. Tandis que lors des périodes de faibles fluctuations, les batteries prennent le relais mais aussi rechargent les supercondensateurs. Ainsi, la courbe de puissance demandée aux batteries est lissée [15].

C'est pourquoi, ce type de connexion est proposé pour des applications nécessitant d'améliorer la durée de vie des batteries en limitant leur charge/décharge. Cette architecture peut être utilisée pour un profil composé d'une impulsion de puissance élevée (démarrage du moteur) suivie d'une demande de consommation constante (pendant que le véhicule est en fonctionnement) [40].

Il s'agit d'une architecture qui peut être utilisée pour notre système embarqué sur aéronef. La tension de notre bus DC nécessitant une bonne stabilité, un convertisseur Boost DC/DC est connecté en sortie des deux packs (Figure 3.2).

- Toutefois, il n'est pas possible de contrôler la plage de puissance utilisée par l'une ou l'autre source d'énergie. La solution est d'intégrer un convertisseur DC/DC entre les sources comme indiqué en figure 3.1(b). Ce choix permet davantage de flexibilité. Le rapport cyclique α appliqué au convertisseur permet de sélectionner le dispositif devant fournir l'énergie demandée et fournit donc une variable de contrôle.

Le convertisseur DC/DC contrôle la sortie de courant de la source de stockage A, permettant à sa tension de varier, tandis que la source de stockage B fournit la puissance restante nécessaire à la charge.

Typiquement, le dispositif de stockage d'énergie avec une plus grande fluctuation de tension est utilisé comme "source de stockage A" (pour notre étude, le pack de supercondensateurs - Figure 3.4). Un autre critère peut être de mettre le dispositif plus sensible à la place de la "source de stockage A" pour prolonger la durée de vie du système en conditionnant la sortie de courant (pack de batteries - Figure 3.3) [54].

Les systèmes utilisant cette topologie comprennent des batteries et des supercondensateurs [28], [21], [36]; des piles à combustibles et des batteries et/ou des supercondensateurs [61], [19], [29].

- La topologie illustrée à la figure 3.1(c), représente chaque source d'alimentation connectée à un convertisseur DC/DC; la sortie des convertisseurs étant connectée au bus. Un tel système fournit le plus haut niveau de flexibilité, chaque source d'énergie étant autorisée à fonctionner dans ses conditions optimales. Le fait de disposer de

convertisseurs dédiés à chaque source permet de mettre en œuvre un large éventail de topologies et de stratégies de contrôle.

Cette architecture est décrite dans un grand nombre d'articles [26], [34], [27], [39], [18], [74]. Des recherches dans le domaine de l'aéronautique, basée sur cette structure sont également réalisées [56], [57], [59].

Ces architectures embarquées standards nous servent de base pour déterminer l'ensemble des solutions de structures hybrides à étudier.

Les performances de chaque système reposent sur différents critères [65] qui sont :

- La capacité de stockage de l'énergie (F ou Ah).
- Le débit lors d'une charge et/ou d'une décharge (W ou A).
- La durée de vie exprimée en temps ou en cycle.
- L'efficacité de charge /décharge (%).
- Le coût initial ($€/Wh$, $€/W$).
- Le coût d'exploitation ($€/Wh$, $€/W$).
- Et pour les systèmes embarqués, les densités d'énergie (Wh/kg et Wh/m^3) et de puissance (W/kg et W/m^3).

Certaines valeurs de ces critères sont encore amenées à évoluer dans le temps. Avec le début de la production en série des supercondensateurs dans les années 2000, leur coût diminue fortement. Également, la recherche s'oriente vers des supercondensateurs à plus forte densité de stockage énergétique. C'est pourquoi, les performances de chacun des systèmes sont basées sur des articles récents ([84], [110]).

2/ CHOIX DES ARCHITECTURES/SPÉCIFICITÉS

Les critères de choix de systèmes hybrides simples et fréquemment utilisés sont appliqués. Il apparaît que ces dispositifs électriques hybrides peuvent être classés en trois catégories (Paragraphe1). C'est pourquoi, de cette base sont choisies nos différentes architectures.

La figure 3.2 représentant un pack de batteries couplé à un pack de supercondensateurs couplé à un convertisseur Boost DC/DC est issue de l'architecture de la figure 3.1 (a).

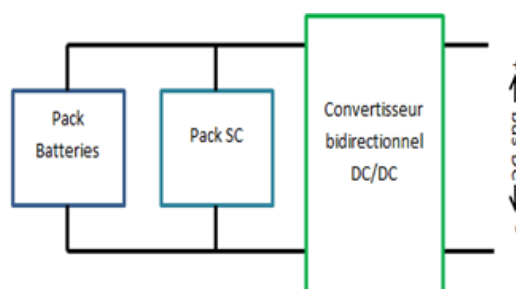


FIGURE 3.2 – Batteries - Supercondensateurs couplés à un convertisseur Boost - Filiation Figure 3.1 (a)

Les figures 3.3 et 3.4 représentent respectivement "un pack de batteries couplé à un conver-

tisseur Boost DC/DC et un pack de supercondensateurs connecté au bus DC" et "un pack de supercondensateurs couplé à un convertisseur Boost DC/DC et un pack de batteries connecté au bus DC". Ces systèmes sont issues de l'architecture de la figure 3.1 (a).

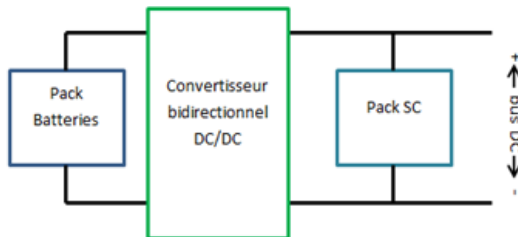


FIGURE 3.3 – Batteries couplées à un convertisseur Boost et Supercondensateurs sur le bus DC - Filiation Figure 3.1 (b)

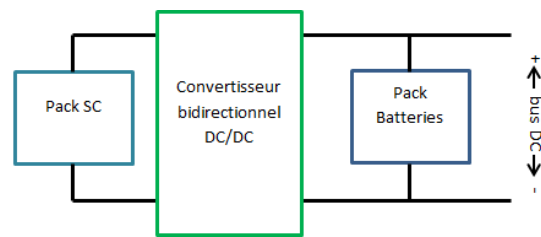


FIGURE 3.4 – Supercondensateurs couplés à un convertisseur Boost et Batteries sur le bus DC - Filiation Figure 3.1 (b)

La figure 3.5 représentant un pack de batteries couplé à un convertisseur Boost DC/DC et un pack de supercondensateurs couplé à un convertisseur Boost DC/DC est issue de l'architecture de la figure 3.1 (c).

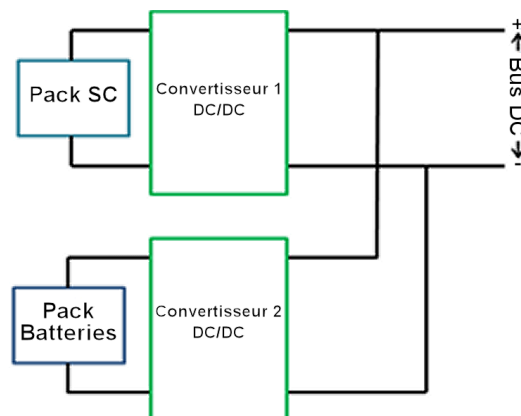


FIGURE 3.5 – Batteries couplées à un convertisseur Boost et Supercondensateurs couplés à un convertisseur Boost - Filiation Figure 3.1 (c)

L'architecture composée de deux packs, chacun couplés à un convertisseur (Figure 3.5), fournit deux variables de contrôle via les rapports cycliques des convertisseurs. Le convertisseur associé au pack de batteries commande celui-ci pour une réponse à des demandes de puissance basse fréquence. Le convertisseur associé au pack de supercondensateurs commande celui-ci pour une réponse à des demandes à fréquences plus élevées.

Pour rappel, la masse totale d'un système à embarquer dans un aéronef est un critère fondamental. La masse ajoutée par ces deux convertisseurs Boost DC/DC ne peut constituer un paramètre négligeable.

Par souci d'économie de masse à embarquer, il peut être judicieux de se passer d'un convertisseur Boost DC/DC (Figures 3.3 3.4); la littérature proposant de tels systèmes hybrides électriques. Dans pareil cas, il reste à savoir si notre tension de sortie du système est suffisamment stable et si la masse ajoutée par un nombre plus important de composants par pack ne supplante pas le gain apporté par la suppression de ce convertisseur.

- Soit, le contrôle du convertisseur associé au pack de batteries se fait sur la partie continue du signal. La puissance restante demandée (dynamique rapide - impulsion de puissance) est délivrée automatiquement par le pack de supercondensateurs. Les composants de ce dernier ont un temps de réponse très court et sont directement connectés sur le bus (Figure 3.3).

L'inconvénient, alors, pour notre application embarquée sur aéronef consiste en la nécessité d'avoir un nombre important minimum de supercondensateurs en série. Effectivement, ceux-ci ne tolèrent pas plus de 2,8 Volts à leurs bornes pour une tension de bus de 1pu largement plus importante. L'apport de masse peut alors devenir conséquent.

- Soit, en déterminant la puissance haute fréquence demandée, il est possible de contrôler le convertisseur associé au pack de supercondensateurs. La puissance restante demandée (basse fréquence - régime permanent) est délivrée par le pack de batteries, directement connecté sur le bus (Figure 3.4).

Dans ce cas, le pack de batteries se décharge directement sur le bus. Or, seule une faible variation de tension de bus est autorisée. C'est pourquoi, une faible profondeur de décharge des batteries est à prévoir. En aucun cas, les supercondensateurs ne pourront pallier à la baisse de tension aux bornes des batteries car il s'agit d'une réponse à une demande en énergie.

Le quatrième système hybride étudié est constitué d'une association directe des deux packs, le tout couplé à un convertisseur Boost DC/DC (Figure 3.2). Dans pareil cas, le contrôle de demande de puissance par la fréquence sur tel ou tel pack est impossible. La répartition des puissances se fera de manière incontrôlée en fonction des impédances internes des composants.

Pour ne négliger aucune solution, il peut être intéressant d'étudier deux autres dispositifs non hybride impliquant un pack de batteries (avec et sans convertisseur Boost DC/DC). Le fait de connecter directement le pack de batteries sur le bus DC nécessite une faible profondeur de décharge du pack ; soit, un sur-dimensionnement de celui-ci (Figure 3.6).

Pour éviter cela, un convertisseur Boost DC/DC peut être couplé au pack 3.7.

S'il s'avère que de tels dispositifs sont applicables, l'inconvénient immédiatement constaté est la durée de vie du système : les batteries devant répondre à toute la gamme de fréquence du profil (spécificités "Durée de vie" : 2/5 - Figure 2.10(a) et "Densité de puissance" : 2/5 - Figure 2.11(a)).

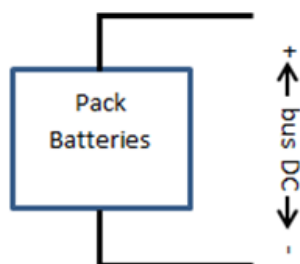


FIGURE 3.6 – Batteries seules sur le bus DC

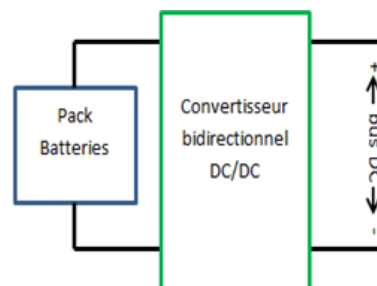


FIGURE 3.7 – Batteries couplées à un convertisseur Boost

Ces six architectures sont étudiées et font l'objet d'un comparatif sur les performances, le coût, la durée de vie et le dimensionnement.

Remarque : le convertisseur Boost DC/DC est préféré pour diverses raisons :

- La possibilité de maintenir une valeur de tension sur le bus DC constante.
 - Le fait d'augmenter l'amplitude de la tension continue, permet de ne pas avoir un nombre important minimum de cellules de pack en série. Ainsi, il devient possible de ne pas surdimensionner le pack en question.
- (nota : des dimensionnements avec convertisseurs Buck DC/DC ont été simulé et n'ont pas été concluant. Les packs sont alors surdimensionnés en nombre de cellules en série. La tension en sortie de pack doit toujours être supérieure à 1pu, notamment en fin de profil - Paragraphe 3)

Un rappel sur l'utilisation et le principe de fonctionnement des convertisseurs Boost DC/DC semble nécessaire. Mais également, sur la façon de répartir les différentes puissances demandées à chaque pack.

3/ PROFIL DE MISSION ÉTUDIÉ

L'hélicoptère de notre étude dispose de deux bus DC (Basse Tension et Haute Tension) de 28V et de 1pu (Chapitre 2 Paragraphe 4). Son profil de mission le plus contraignant en puissance maximale et en énergie demandées est le profil de démarrage de l'appareil hors parking. Durant cette phase, les alternateurs n'étant pas en mode générateur et aucune source énergétique externe disponible, le profil de charge est donc réparti entre les deux éléments de stockage d'énergie électrique [68].

Les sources de stockage à pleine charge seront donc capable de répondre à la demande en énergie et puissance de tous les autres profils.

L'allure et la durée de ce profil sont confidentielles et ne peuvent être dévoilées. La figure 3.8 montre une fin de profil similaire.

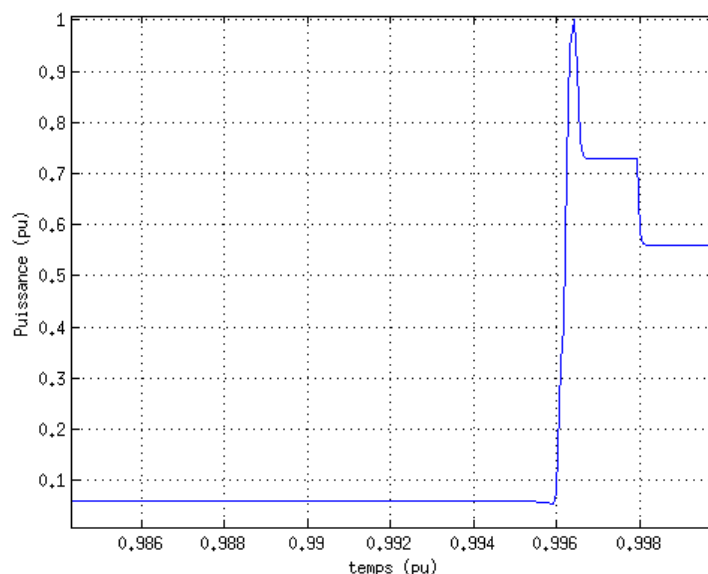


FIGURE 3.8 – Fin de profil - démarrage d'un moteur

De 0pu [sec] à 0,996pu [sec], le système doit constamment fournir une énergie. Les demandes ponctuelles de puissance sont nombreuses; la plus conséquente étant lors du démarrage du moteur en fin de séquence. En toute fin de profil, les alternateurs prennent le relais, la puissance demandée aux sources de stockage diminue.

La puissance instantanée, imposée par la charge, est reportée sur les différents packs. La valeur de la tension en sortie de pack diminuant progressivement, pour délivrer cette puissance nécessaire, le courant demandé devient d'autant plus important.

4/ RÉPARTITION DES PUISSANCES AUX DIFFÉRENTS PACKS POUR NOTRE PROJET

L'hélicoptère de notre étude dispose de deux bus DC (Basse Tension et Haute Tension) de 28V et de 1pu (Chapitre 2 Paragraphe 4). Son profil de mission le plus contraignant en puissance maximale et en énergie demandées est le profil de démarrage de l'appareil hors parking (Paragraphe 3). Durant cette phase, les alternateurs n'étant pas en mode génération, le profil de charge est donc réparti entre les deux éléments de stockage d'énergie électrique. La fréquence de notre profil de puissance peut être connue (Chapitre 4 Paragraphe 1.2.1). C'est pourquoi, l'étude de la répartition en fonction de la fréquence ne faisant pas partie intégrante de ce travail, l'utilisation d'une méthode simple basée sur les filtres passe-bas est choisie.

Certaines architectures électriques permettent ce contrôle de répartition de demande de puissance aux packs de composants. L'approche fréquentielle, majoritairement utilisée dans les gestions d'énergie, peut intégrer cette stratégie de contrôle [60]. Ainsi, La fréquence de coupure d'un filtre passe-bas, par le biais des convertisseurs, sollicite le pack de composants de stockage répondant le mieux aux demandes de puissances et d'énergie instantanées (Figures 3.9 3.10).

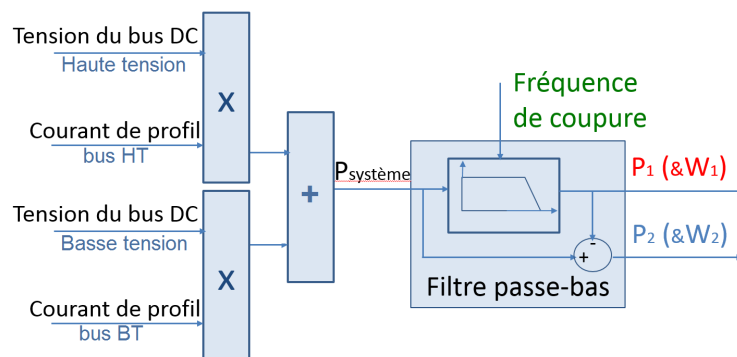


FIGURE 3.9 – Répartition des demandes de puissances et d'énergie par approche fréquentielle

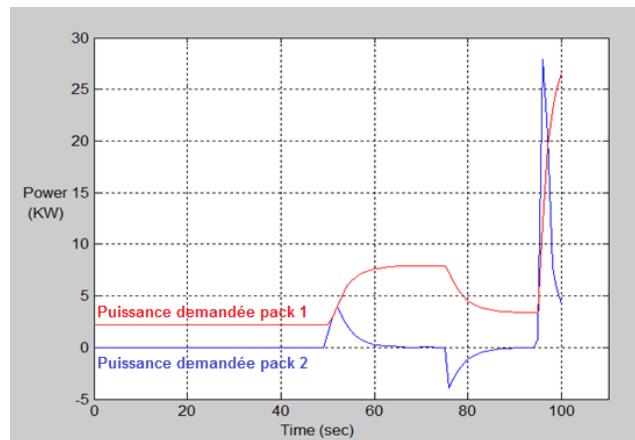


FIGURE 3.10 – Répartition des puissances et énergie entre packs

5/ CONVERTISSEUR BOOST DC/DC

Un convertisseur Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une tension continue de plus forte amplitude. Le rapport cyclique α va permettre de fixer le coefficient multiplicateur à appliquer pour connaître la tension moyenne de sortie en fonction de la tension moyenne d'entrée.

5.1/ NÉCESSITÉ DU CONVERTISSEUR BOOST

La tension en sortie des packs n'est pas stable. Elle est fonction de l'état de charge des batteries ou du ratio de tension des supercondensateurs, ainsi que de la valeur de la charge en sortie. Or, le cahier des charges impose une tension continue sur le bus DC de 1pu. Il est possible, très exceptionnellement, d'atteindre les 1,02pu ou de descendre à 0,88pu. Par contrôle, le convertisseur Boost va permettre de réguler cette tension de sortie et la maintenir au 1pu souhaité, et cela, quelque soit la puissance demandée au système.

5.2/ APPLICATIONS

Le rapport de tension moyenne pour un convertisseur Boost DC/DC est :

$$U_{bus} = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot U_{pack} , \text{ avec } 0 \leq \alpha < 1 \quad (3.1)$$

On définit le coefficient multiplicateur $m (\geq 1)$ par : $m = \frac{1}{(1-\alpha)}$.

En contre-partie, le courant demandé au pack sera plus important par rapport au courant demandé par le bus DC (équilibre des puissances) :

$$I_{pack} = m \times I_{bus} \quad (3.2)$$

Le convertisseur impose un coefficient multiplicateur maximum au-delà duquel sa tension de sortie n'est plus parfaitement stabilisée. De ce fait, on souhaite ne pas utiliser un coefficient

multiplicateur supérieur à $m_{max} = 2$, même s'il ne s'agit pas de la limite matérielle maximale. C'est pourquoi, la tension de sortie des packs (donc la tension d'entrée des convertisseurs) ne doit pas descendre sous les 0,5pu ; la tension nominale du bus étant de 1pu (Figure 3.11).

De plus, la tension bus peut descendre exceptionnellement à 0,88pu ($U_{bus_{min}}$). Notre convertisseur doit toujours fonctionner en mode élévateur de tension. La tension de sortie du pack de composants ne doit donc excéder 0,88pu.

En fonctionnement normal ($U_{bus} = 1pu$), à pleine charge du pack ($U_{pack} = 0,88pu$), le coefficient multiplicateur est égale à : $m_{min} = \frac{1pu}{0,88pu} \approx 1,13$ (Figure 3.11).

Connaissant les bornes du coefficient multiplicateur m , il est possible d'en déduire les limites appliquées au rapport cyclique α :

$$1,13 \leq m \leq 2$$

$$\Rightarrow 0,12 \leq \alpha \leq 0,5$$

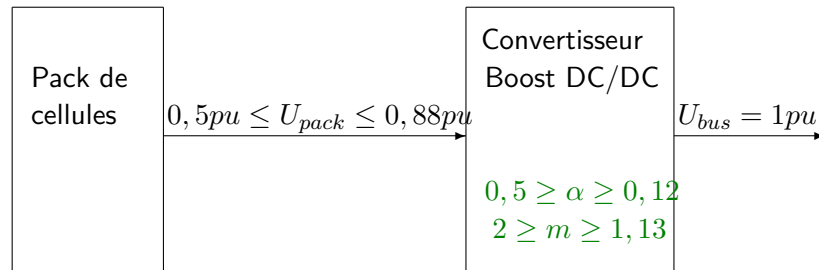


FIGURE 3.11 – Stabilisation de la tension du bus - Ajustement du coefficient multiplicateur m du convertisseur Boost

5.3/ CHOIX DU CONVERTISSEUR ET MISE EN PLACE

Un type de convertisseur Boost DC/DC "standardisé" est utilisé par l'entreprise Airbus en vue de l'embarquer dans l'hélicoptère "plus électrique" de notre projet. Ce convertisseur Boost DC/DC déjà en place est un convertisseur trois branches (Figure 3.12). Par soucis de confidentialité, les caractéristiques de ce convertisseur ne sont pas dévoilées.

Chacune des branches supporte une puissance maximale et un courant maximum (respectivement $P_{\frac{1}{3}conv_{max}}$ et $I_{\frac{1}{3}conv_{max}}$).

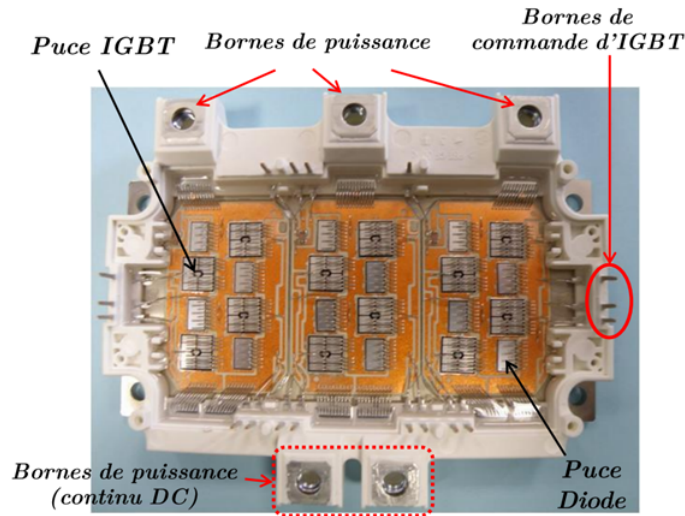


FIGURE 3.12 – Exemple de convertisseur entrelacé à trois branches

On souhaite utiliser qu'un seul convertisseur entrelacé à trois branches et cela quel que soit l'architecture électrique (hybride ou non) choisie.

- Pour les architectures ne nécessitant qu'un convertisseur (Architectures/Figures 3.2, 3.3, 3.4, 3.7), la puissance et le courant que peut délivrer le/les packs peut être répartie sur une à trois branches (Figure 3.13). Ainsi, les valeurs maximales de puissance et de courant du pack ($P_{pack_{max}}$ et $I_{pack_{max}}$) pouvant être délivrée sont égales à :

$$\begin{cases} P_{pack_{max}} = 3 \times P_{\frac{1}{3}conv_{max}} \\ I_{pack_{max}} = 3 \times I_{\frac{1}{3}conv_{max}} \end{cases} \quad (3.3)$$

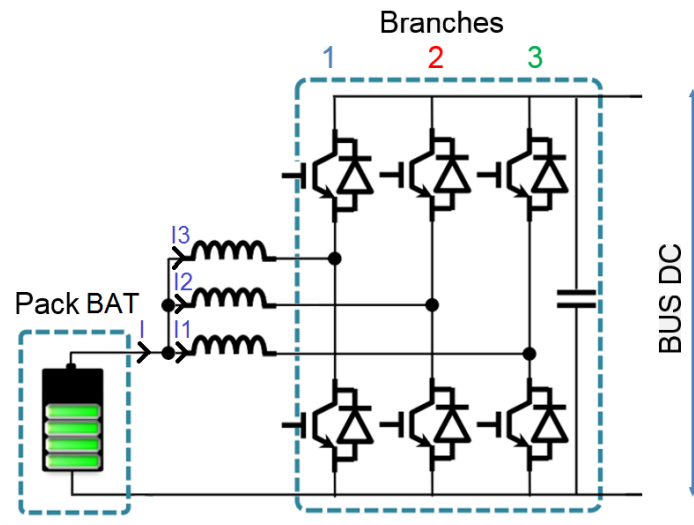


FIGURE 3.13 – Connexion du convertisseur entrelacé trois branches à un seul pack

- L'architecture disposant de deux convertisseurs (Architecture/Figure 3.5) présente une contrainte supplémentaire sur les puissances et les courants donnés par les packs. En effet, les trois entrées du convertisseur sont à répartir sur les sorties des deux packs. Ainsi, la puissance maximale (et le courant maximum) délivrée par un pack est moitié

moins importante que la puissance maximale (et le courant maximum) pouvant être délivrée par l'autre pack.

L'exemple en Figure 3.14 autorise une puissance maximale (et courant maximum) deux fois plus importante pour le pack 1 que pour le pack 2.

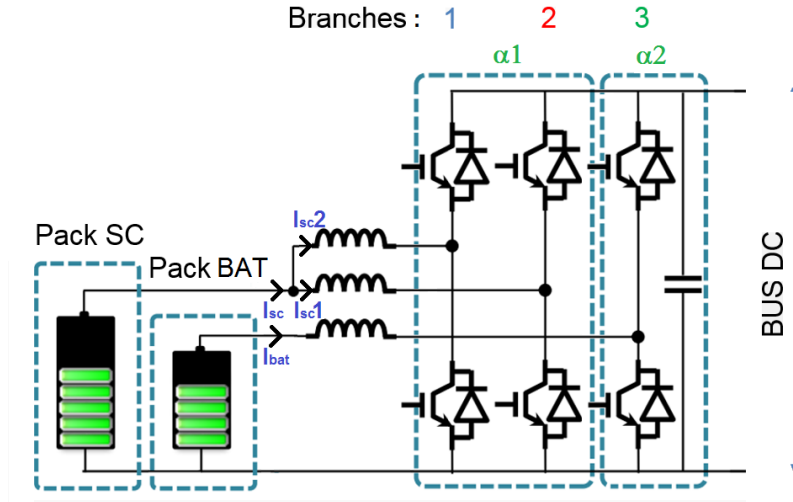


FIGURE 3.14 – Exemple de connexion du convertisseur trois branches aux deux packs
Dans ce cas, les puissances maximales (et courants maximums) pouvant être fournies par les packs sont égales à :

$$\text{pour un pack} : \begin{cases} P_{pack1_{max}} = 2 \times P_{\frac{1}{3}conv_{max}} \\ I_{pack1_{max}} = 2 \times I_{\frac{1}{3}conv_{max}} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\text{pour l'autre pack} : \begin{cases} P_{pack2_{sc_{max}}} = 1 \times P_{\frac{1}{3}conv_{max}} \\ I_{pack2_{sc_{max}}} = 1 \times I_{\frac{1}{3}conv_{max}} \end{cases} \quad (3.5)$$

5.4/ RAPPORT DE PUISSANCE ET DE MASSE POUR UN CONVERTISSEUR DONNÉ

L'objectif final est de déterminer une masse totale du système incluant un ou plusieurs convertisseurs. La masse de ces derniers ne peut être négligée et sa valeur ($masse_{conv}$) peut être estimée de deux manières différentes.

- Soit, on utilise les convertisseurs déjà en place et on détermine le nombre minimum de branches capables de supporter la puissance maximale demandée par la charge.

$$masse_{conv} = \text{nombre de branches nécessaires} \times m_{\frac{1}{3}conv}$$

$$\Rightarrow masse_{conv} = \left\{ \left\lceil \frac{P_{pack_{bat_{max}}}}{P_{\frac{1}{3}conv_{max}}} \right\rceil + \left\lceil \frac{P_{pack_{sc_{max}}}}{P_{\frac{1}{3}conv_{max}}} \right\rceil \right\} \times m_{\frac{1}{3}conv} \quad (3.6)$$

L'essentiel de la masse provenant des inductances, un nombre minimum d'entre elles est mis en place. Connaissant leur masse, il devient possible d'approcher la valeur de la masse du convertisseur complet.

- Soit, connaissant la masse par branche $m_{\frac{1}{3}conv}$ du convertisseur, connaissant la puissance maximale supportée $P_{\frac{1}{3}conv_{max}}$ par une branche, il est aisé de déterminer un

rapport puissance/masse [79].

$$P_{conv_{massique}} = \frac{P_{\frac{1}{3}conv_{max}}}{m_{\frac{1}{3}conv}} = 2,5 \text{ kW/kg} \quad (3.7)$$

En fonction de la puissance délivrée par le pack de composants, il est alors possible de définir une masse approximative que peut prendre le/les convertisseurs utilisés pour notre système hybride.

$$masse_{conv} = \frac{P_{pack_{max}}}{P_{conv_{massique}}} = \frac{P_{pack_{max}}}{2,5 \text{ kW/kg}} \quad (3.8)$$

Cette dernière solution est préférée pour déterminer la masse du convertisseur lors de l'optimisation. Par comparaison entre les deux méthodes, l'estimation des masses trouvées au chapitre 5 est assez similaire.

6/ HYBRIDATION PACK DE BATTERIES / SUPERCONDENSATEURS - PERFORMANCES

Cette partie indique la manière dont les différents systèmes hybrides électriques choisis sont mis en œuvre. Une approche est également présentée sur les durées de vie en cycle de charge/décharge, le rendement en fonction du type de stockage et les coûts d'investissement et d'entretien pour chaque architecture.

6.1/ COMPOSANTS CONSIDÉRÉS LORS DE CE TRAVAIL

Ce projet fait suite à différents travaux déjà effectués. Entre autres, le manuscrit de thèse de N.Devillers [68] fait état de bases de données de batteries Lithium-ion et de supercondensateurs Batscap (Tableaux 3.1,3.2). Des caractéristiques s'y trouvant sont déduits différents paramètres qui nous seront utiles.

TABLE 3.1 – Liste des batteries utilisées

Caractéristiques à 25 °C	Unité	Cell. 2Ah	Cell. 4Ah	Cell. 4,8Ah	Cell. 8Ah
Capacité nominale : $C_{bat_{25^{\circ}C}}$	Ah	2	4	4,8	8
Résistance interne : $R_{bat_{25^{\circ}C}}$	mΩ	8	12	20	4,5
Tension nominale : U_{bat}	V	3,7	3,7	3,7	3,7
Tension maximale : $U_{bat_{max}}$	V	4,2	4,2	4,2	4,2
Courant maximum : $I_{bat_{max}}$	A	30	8	96	16
Courant max (pendant 1s) : $I_{bat_{pulse}}$	A	60	12	192	24
Masse de la batterie : m_{bat}	g	50	82	115	160
Volume de la batterie : vol_{bat}	dm ³	0,029	0,041	0,065	0,080
Puissance maximale : $P_{bat_{max}}$	W	126	33,6	403,2	67,2
Puissance massique maximale : $P_{bat_{max}}^*$	W/g	2,52	0,41	3,51	0,42
Énergie maximale stockée : $W_{bat_{max}}$	Wh	7,40	14,8	17,76	29,6
Densité massique d'énergie : $W_{bat_{max}}^*$	Wh/kg	148	180,5	154,4	185

TABLE 3.2 – Liste des supercondensateurs utilisées

Caractéristiques à 25 ° C	Unité	Batscap 650	Batscap 1200	Batscap 3000
Capacité nominale : $C_{sc25^{\circ}C}$	F	650	1200	3000
Résistance interne : $R_{sc25^{\circ}C}$	$m\Omega$	0,8	0,58	0,29
Tension nominale : U_{sc}	V	2,7	2,7	2,7
Tension maximale : U_{scmax}	V	2,8	2,8	2,8
Courant maximum : I_{scmax}	A	105	110	150
Courant max (pendant 1s) : $I_{scpulse}$	A	875	1600	4000
Masse du supercondensateur : m_{sc}	g	200	300	550
Volume du supercondensateur : vol_{sc}	dm^3	0,15	0,233	0,411
Puissance maximale : P_{scmax}	kW	2,28	3,15	6,27
Puissance massique maximale : P_{scmax}^*	kW/kg	11,4	10,5	11,4
Énergie maximale stockée : W_{scmax}	Wh	0,658	1,215	3,036
Densité massique d'énergie : W_{scmax}^*	Wh/kg	3,29	4,05	5,52

6.2/ GESTION FRÉQUENTIELLE DES COMPOSANTS DES PACKS

Comme mentionné dans les manuscrits de thèse de C.Akli [32] et N. Devillers [68], le rapport de la densité de puissance et de la densité énergétique des composants représente une fréquence f_{bat} et f_{sc} (Equation 3.9). Cette fréquence indique la fréquence des cycles que peut supporter le composant.

$$f_{bat} = \frac{P_{batmax}^* [W/kg]}{W_{batmax}^* [Ws/kg]} \text{ et } f_{sc} = \frac{P_{scmax}^* [W/kg]}{W_{scmax}^* [Ws/kg]} \quad (3.9)$$

A partir du diagramme de Ragone (Figure 2.12), les différents éléments peuvent être disposés sur un plan fréquentiel (Figure 3.15).

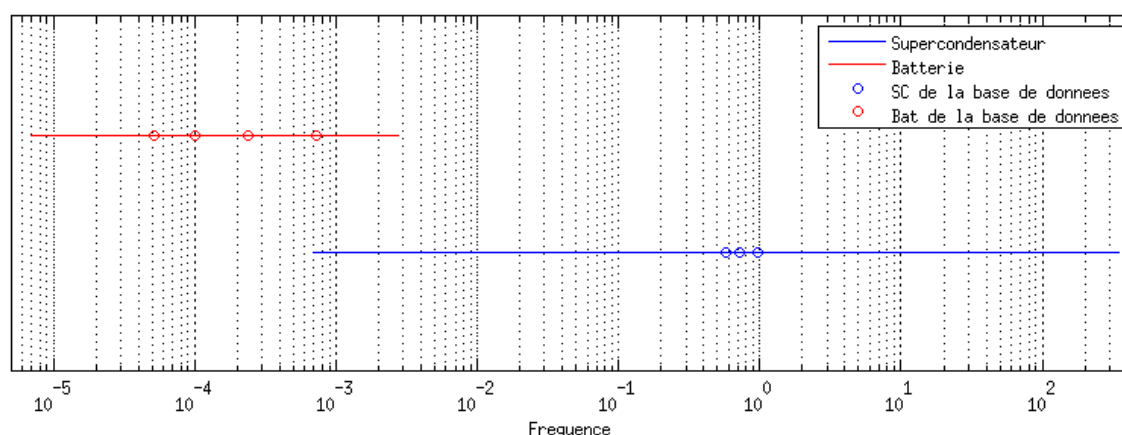


FIGURE 3.15 – Projection du diagramme de Ragone sur un plan fréquentiel [68]

Cette représentation nous permet de fixer les limites de la fréquence de coupure permettant de répartir les demandes de puissance et d'énergie entre les deux packs.

La zone d'incertitude de sollicitation entre les batteries et les supercondensateurs est située entre $1mHz$ et $1Hz$ (Figure 3.15).

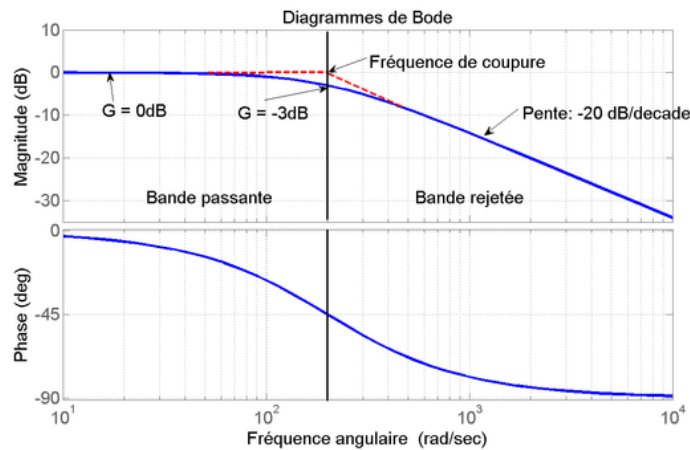


FIGURE 3.16 – Diagramme de Bode du filtre passe-bas d'ordre 1 [106]

Pour un filtre passe-bas d'ordre 1, la fréquence de coupure est fixée lorsque le gain entre entrée et sortie est de $-3dB$. Au-delà, ce gain diminue de $-20dB/décade$ (Figure 3.16).

Ainsi, pour être sûr de ne solliciter que les batteries à $1mHz$ et que les supercondensateurs à $1Hz$, il faut descendre d'une décade les bornes possibles de notre fréquence de coupure. De ce fait, on a :

$$0,1mHz \leq f_c \leq 0,1Hz \quad (3.10)$$

Par contre, lorsque que les supercondensateurs sont directement connectés sur le bus DC (Figure 3.3), ceux-ci fournissent la puissance demandée mais ne peuvent maintenir longtemps la tension sur le bus à $1pu$. Dans pareil cas, les batteries doivent rapidement reprendre le relais. La limite supérieure de fréquence de coupure doit être rehaussée. Au-delà d'une certaine fréquence ($10Hz$), la résistance interne de la batterie ne dépend plus de l'état de charge [68] :

$$0.1mHz \leq f_c \leq 10Hz. \quad (3.11)$$

Lorsque le pack de batteries est connecté sur le bus (Figure 3.4), celui-ci doit maintenir une tension de bus supérieure à $0,88pu$ durant tout le profil de mission. Les supercondensateurs ne peuvent combler le manque d'énergie nécessaire pour maintenir strictement la tension à $1pu$. La taille du pack de batteries risque d'être conséquente. Pour pouvoir la solliciter davantage, les limites de fréquence de coupure sont également augmentées : $0.1mHz \leq f_c \leq 10Hz$.

Tous les autres systèmes étudiés ne peuvent être contrôlés par cette fréquence de coupure.

6.3/ DIMENSIONNEMENT DES PACKS

Ce paragraphe reprend les équations trouvées précédemment (Chapitre 2, paragraphe 6), lors de l'assemblage en série et en parallèle des modèles quasi-statiques. Ceci permet d'obtenir une première étape en vue de caractériser le pack de batteries et le pack de supercondensateurs.

6.3.1/ DIMENSIONNEMENT D'UN PACK DE BATTERIES

En fonction du nombre de cellules en série (NS_{bat}) et en parallèle (NP_{bat}) de batteries, les différents paramètres du pack sont rapportés au modèle quasi-statique (Figure 3.17). Dans un

premier temps, les caractéristiques internes des batteries sont considérées comme parfaitement identiques.

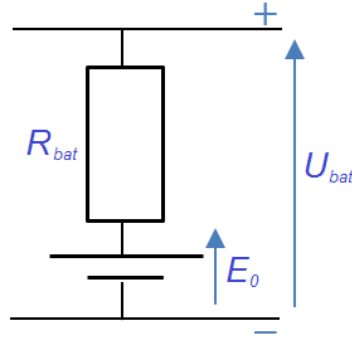


FIGURE 3.17 – Modèle quasi-statique de batterie

Par convention, la puissance est positive lorsque la batterie restitue de l'énergie et est négative lorsqu'elle emmagasine de l'énergie.

La puissance délivrée par une batterie est exprimée comme suit :

$$P_{bat} = U_{bat} \times I_{bat}$$

Et la tension aux bornes de la batterie :

$$U_{bat} = E_0 - R_{bat} \times I_{bat}$$

À partir de ces caractéristiques, il s'agit de déterminer les caractéristiques internes équivalentes du pack de batteries $E_{0_{pack_{bat}}}$, $R_{pack_{bat}}$, $U_{pack_{bat}}$ (Figure 3.18) en fonction du nombre de cellules en série NS_{bat} et en parallèle NP_{bat} .

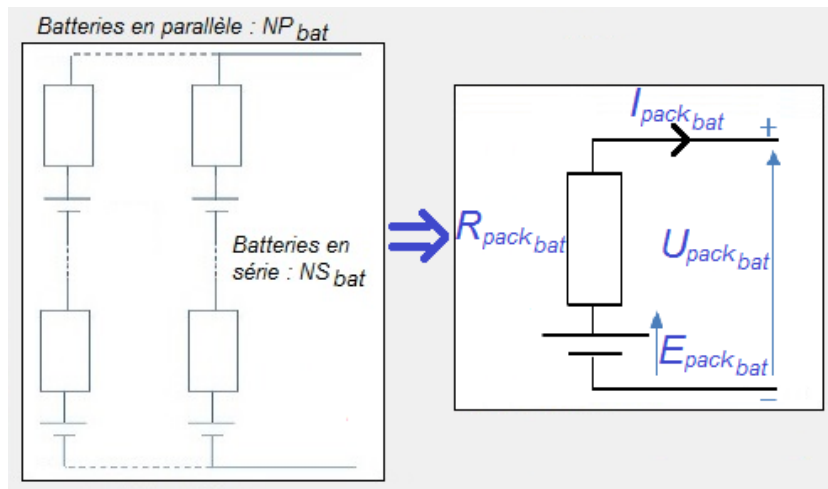


FIGURE 3.18 – Modèle quasi-statique équivalent du pack de batteries

La tension à vide équivalente $E_{0_{pack_{bat}}}$ du pack de batteries est égal à la somme des tensions à vide des batteries d'une branche du pack :

$$E_{0_{pack_{bat}}} = NS_{bat} \times E_0 \quad (3.12)$$

Le courant délivré par le pack $I_{pack_{bat}}$ est égale à la somme des courants délivrés par chaque branches du pack :

$$I_{pack_{bat}} = NP_{bat} \times I_{bat} \quad (3.13)$$

La résistance interne équivalente $R_{pack_{bat}}$ se détermine par association de résistances en série et en parallèle :

$$R_{pack_{bat}} = \frac{NS_{bat}}{NP_{bat}} \times R_{bat} \quad (3.14)$$

Finalement, la tension de sortie du pack ($U_{pack_{bat}}$) s'obtient en additionnant les tensions de sortie des batteries d'une branche :

$$U_{pack_{bat}} = NS_{bat} \times U_{bat} \quad (3.15)$$

Ainsi, il est possible de déterminer la puissance délivrée par le pack $P_{pack_{bat}}$ et l'énergie qui y est stockée $W_{pack_{bat}}$, en fonction des caractéristiques d'une batterie :

$$\begin{aligned} P_{pack_{bat}} &= U_{pack_{bat}} \times I_{pack_{bat}} \\ \Rightarrow P_{pack_{bat}} &= NS_{bat} \cdot U_{bat} \times NP_{bat} \cdot I_{bat} \\ \Rightarrow P_{pack_{bat}} &= (NS_{bat} \cdot NP_{bat}) \times (U_{bat} \cdot I_{bat}) \\ \Rightarrow P_{pack_{bat}} &= N_{bat} \times P_{bat} \end{aligned} \quad (3.16)$$

,avec N_{bat} nombre de cellules dans le pack

$$\begin{aligned} \Rightarrow W_{pack_{bat}} &= \int (N_{bat} \times P_{bat}) \cdot dt \\ \Rightarrow W_{pack_{bat}} &= N_{bat} \times W_{bat} \end{aligned} \quad (3.17)$$

,avec W_{bat} énergie stockée dans une cellule du pack

En fonction d'une base de données de caractéristiques de batteries :

- À partir des équations 3.16 et 3.17, connaissant la puissance maximale demandée $P_{pack_{bat_{max}}}$ et l'énergie nécessaire pour répondre au profil de puissance, il est possible de déterminer le nombre minimum de cellules nécessaires $N_{bat_{min}}$ dans le pack.

$$N_{bat_{min}} = \left\lceil \max \left(\frac{W_{pack_{bat}}}{W_{bat}}, \frac{P_{pack_{bat_{max}}}}{P_{bat}} \right) \right\rceil \quad (3.18)$$

- Connaissant la tension maximale tolérée en sortie de pack $U_{pack_{bat_{max}}}$, le courant maximum demandé $I_{pack_{bat_{max}}}$, il est possible de déterminer le nombre de composants maximum en série $NS_{bat_{max}}$ et une première valeur du nombre de cellules en parallèle NP_{bat1} .

$$NS_{bat_{max}} = \left\lfloor \frac{U_{pack_{bat_{max}}}}{U_{bat_{max}}} \right\rfloor \quad (3.19)$$

$$NP_{bat1} = \left\lceil \frac{I_{pack_{bat_{max}}}}{I_{bat_{max}}} \right\rceil \quad (3.20)$$

- À partir du nombre minimum de cellules dans le pack et de leur nombre maximum en série, il devient possible de déterminer une valeur minimale de branches de composants.

$$NP_{bat_{min}} = \max \left(\left\lceil \frac{N_{bat_{min}}}{NS_{bat_{max}}} \right\rceil, NP_{bat1} \right) \quad (3.21)$$

Les trois valeurs $N_{bat_{min}}$, $NS_{bat_{max}}$ et $NP_{bat_{min}}$ servent de point de départ pour caractériser notre pack de batteries et sont rappelées au chapitre 4 paragraphe 1.4.1.

6.3.2/ DIMENSIONNEMENT D'UN PACK DE SUPERCONDENSATEUR

Le schéma quasi-statique d'un supercondensateur (Figure 3.19), permet d'obtenir un schéma de pack équivalent.

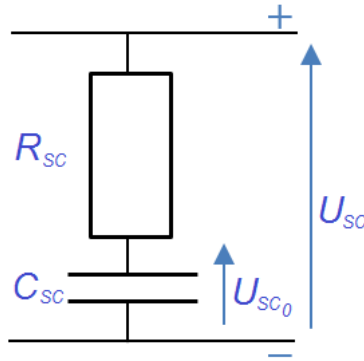


FIGURE 3.19 – Modèle quasi-statique de supercondensateurs

Ainsi, comme pour les batteries, il est possible de déterminer le nombre de cellules en fonction de caractéristiques de différents types de supercondensateurs et de l'énergie à stocker, de la puissance à délivrer pour une tension et un courant déterminé :

- Connaissant la puissance maximale demandée $P_{pack_{sc_{max}}}$ et l'énergie nécessaire $W_{pack_{sc_{max}}}$ pour répondre au profil de puissance, il est possible de déterminer le nombre minimum de cellules nécessaires $N_{sc_{min}}$ dans le pack.

$$N_{sc_{min}} = \left\lceil \max \left(\frac{W_{pack_{sc}}}{W_{sc}}, \frac{P_{pack_{sc_{max}}}}{P_{sc}} \right) \right\rceil \quad (3.22)$$

- Connaissant la tension maximale tolérée en sortie de pack $U_{pack_{sc_{max}}}$, le courant maximum demandé $I_{pack_{sc_{max}}}$, il est possible de déterminer le nombre maximum de

composants en série NS_{scmax} et une première valeur du nombre de cellules en parallèle NP_{sc1} .

$$NS_{scmax} = \left\lceil \frac{U_{pack_{scmax}}}{U_{scmax}} \right\rceil \quad (3.23)$$

$$NP_{sc1} = \left\lceil \frac{I_{pack_{scmax}}}{I_{scmax}} \right\rceil \quad (3.24)$$

- À partir du nombre minimum de cellules dans le pack et de leur nombre maximum en série, il devient possible de déterminer une valeur minimale de branches de composants.

$$NP_{scmin} = \max \left(\left\lceil \frac{NS_{scmin}}{NS_{scmax}} \right\rceil, NP_{sc1} \right) \quad (3.25)$$

Les trois valeurs NS_{scmin} , NS_{scmax} et NP_{scmin} servent de point de départ pour caractériser notre pack de supercondensateurs et sont également rappelées au chapitre 4 paragraphe 1.4.1.

6.3.3/ CONCLUSION SUR LE DIMENSIONNEMENT DES PACKS

En fonction de la puissance maximale, du courant maximum du profil, de la tension maximale souhaitée en sortie de pack et des caractéristiques des cellules, il est possible d'établir un premier dimensionnement des packs.

Ainsi, le fait d'ajouter des cellules dans un pack augmente sa capacité de stockage d'énergie électrique (Wh).

Par batterie Lithium-ion supplémentaire en série, la tension en sortie du pack à pleine charge, est augmentée de 4,2V. Pour les supercondensateurs, cette tension est augmentée de 2,8V. En parallèle, le courant supporté par le pack est augmenté du courant maximum de la cellule ajoutée.

Les systèmes de stockage d'électricité avec des batteries ou des supercondensateurs sont modulaires.

6.4/ PERFORMANCES DES CELLULES DES PACKS

Le supercondensateur sert de tampon et compense la variation de puissance sur un temps court tandis que les variations lentes sont traitées par les batteries. Cela prolonge la durée de vie, économise les coûts de remplacement et d'entretien du pack de batteries.

- Pour les batteries :

La durée de vie des batteries Lithium-ion, utilisées pour l'optimisation, en temps ou en nombre de cycle est estimée, respectivement, à moins de 8 années ou de 1500 à 2000 cycles de décharge en fonction de son type d'utilisation (Tableau 3.3).

Pour les systèmes embarquées sur aéronef, de part leur rendement et leur densité d'énergie, le stockage électrique à l'aide de packs de batteries Lithium-ion est amené à se développer. En revanche, les différents coûts d'investissement, de maintenance et de réparation sont plus importants que pour d'autres types de batteries [46], [65].

- Pour les supercondensateurs :

Les supercondensateurs permettent un stockage d'énergie avec une densité de puissance plus élevée par rapport aux batteries. Ils peuvent décharger leur teneur en énergie en un court laps de temps et ont une durée de vie plus longue (> 500.000 cycles)(Tableau 3.3).

TABLE 3.3 – Performances de la batterie Lithium-ion et du supercondensateur([110] - 2016)

	Batterie Lithium-ion	Supercondensateur
Capacité de stockage (Ah - Wh)	jusqu'à plusieurs Ah	jusqu'à plusieurs Wh
Puissance maximale (kW)	0,1 à 0,5	1 à 10
Durée de vie (année)	< 8 ans	~ 12 ans
Durée de vie (cycle)	~ 1700 (pour un DOD $\simeq$ 0,9)	> 500.000
Rendement	95%	95%
Coût total(€/kW)	~ 400	~ 200
Coût total (€/kWh)	~ 700	~ 1.000
Auto-décharge (/jour)	0,2%	~ 10%
Densité de puissance (kW/dm ³)	0,5 à 5	~ 15
Densité d'énergie (Wh/dm ³)	200 à 400	4 à 7

6.5/ PERFORMANCES ÉLECTRIQUES DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES HYBRIDES

Dans ce paragraphe est indiqué la manière dont les pertes de puissances sont traduites par la fonction renvoyant la valeur de la masse (fonction à minimiser) (chapitre 4). On estime et compare les pertes dues aux convertisseurs DC/DC et aux résistances internes des composants des packs.

Le détail du calcul est indiqué en annexe 6.

Un aperçu du bilan des pertes en fonction de l'architecture électrique choisie est résumé sur la figure suivante 3.20.

Le courant demandé à chaque système varie de 0 à 120A. Pour les architectures hybrides, la demande de puissance est répartie entre les packs en fonction de la fréquence du signal (Figure 3.9). Une répartition réaliste de l'énergie demandée par rapport à l'énergie totale, est d'un rapport de l'ordre de 1/10 pour le pack de supercondensateurs et le restant pour les batteries. La tension de sortie des packs est proche de notre système étudié.

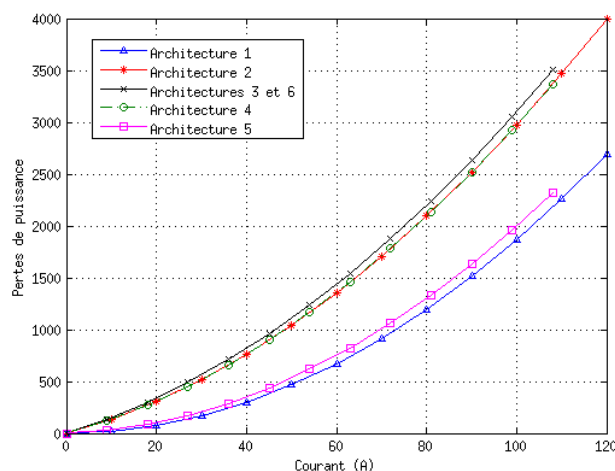
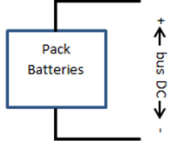
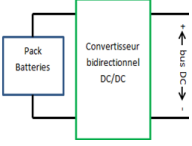
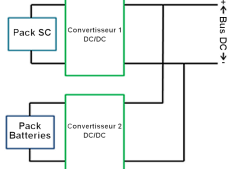
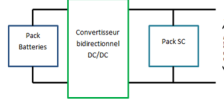
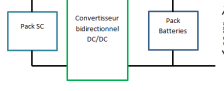
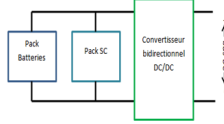


FIGURE 3.20 – Pertes en fonction des architectures électriques et du courant demandé

TABLE 3.4 – Synthèse des pertes par architecture

Architectures	Pertes
Architecture 1 	$\Sigma P_{pertes} = R_{pack_{bat}} \cdot I^2$ Cette architecture est uniquement constituée d'un pack de batteries (Équation A.4 en annexe). Les pertes de puissances ne sont dues qu'aux seules caractéristiques internes du pack.
Architecture 2 	$\Sigma P_{pertes} = 0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I^2)$ Cette architecture est constituée d'un pack de batteries couplé à un convertisseur Boost DC/DC (Équation A.5 en annexe). L'augmentation des pertes est causée par l'ajout du convertisseur (rendement $\sim 95\%$).
Architecture 3 	$\Sigma P_{pertes} = 0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} + U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc}) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 + R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2)$ Cette architecture est constituée d'un pack de batteries couplé à un convertisseur avec en parallèle un pack de supercondensateurs couplé à un second convertisseur. (Équation A.7 en annexe). L'augmentation des pertes est causée par l'apport d'un second convertisseur, mais atténué par le fait d'une résistance interne moindre du pack de supercondensateurs.
Architecture 4 	$\Sigma P_{pertes} = 0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat}) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2) + R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2$ Cette architecture représente un pack de batteries couplés à un convertisseur, avec en parallèle un pack de supercondensateurs. (Équation A.8 en annexe). Les pertes dues au pack de supercondensateurs sont négligeables. C'est pourquoi, elles sont équivalentes aux pertes de l'architecture 2.
Architecture 5 	$\Sigma P_{pertes} = 0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat}) + R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 + 0,95 \times (R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2)$ Cette architecture représente un pack de supercondensateurs couplés à un convertisseur, avec en parallèle un pack de batteries (Équation A.9 en annexe). Seul $1/10^{\circ}$ du courant est demandé aux supercondensateurs, les pertes de puissance au niveau du convertisseur sont donc minimales. C'est pourquoi elles sont légèrement supérieures aux pertes de l'architecture 1.
Architecture 6 	$\Sigma P_{pertes} = 0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} + U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc}) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 + R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2)$ Cette architecture couple un pack de batteries à un pack de supercondensateurs le tout couplé à un convertisseur. Les pertes de puissances (Équation A.10 en annexe) sont légèrement supérieures au système précédent. Ceci est dû à l'interaction entre les packs connectés ensemble.

6.6/ PERFORMANCES DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES HYBRIDES : DURÉE DE VIE ET COÛT

Analyse de la durée de vie du pack de batteries :

Le profil de mission étudié est le plus contraignant sur le plan de l'énergie nécessaire à stocker. L'état de charge moyen des batteries en fin de profil est estimée.

En fin de profil, le pack de batteries à environ utilisé les $8/9^{\circ}$ de son énergie restituable lorsqu'il est connecté à un convertisseur. La durée de vie du pack de batteries en nombre de profil de démarrage pouvant être exécuté peut être estimée à :

$$1700cycles \times \frac{9}{8} \simeq 1900 \text{ profils de mission de démarrage}$$

Lorsque le pack est directement connecté sur le bus, l'énergie restituée en fin de profil est de l'ordre de $2/9^{\circ}$. Dans ce cas, la tension de sortie en fin de profil ne doit pas être inférieure à 0,88pu. Seul un nombre plus important de cellules dans le pack permet cela. Les batteries vont moins se décharger.

La durée de vie du pack de batteries en terme de nombre de profil de démarrage est plus grande :

$$1700cycles \times \frac{9}{2} \simeq 7600 \text{ profils de mission de démarrage}$$

L'aéronautique nécessite un niveau de sécurité extrême. Lors du remplacement de packs de batteries, ceux-ci doivent déjà avoir été testés sur plusieurs cycles de charge-décharge pour éviter tous dysfonctionnements dus à un défaut de fabrication.

Pour toutes ces raisons, le nombre de profils de démarrage est transposé en nombre de profils moins une centaine de cycles réalisés au préalable.

Ainsi, la durée de vie du pack de batteries est de 1900 ou de 7600 profils de mission en fonction de l'architecture choisie.

Analyse du coût par architecture :

L'énergie à stocker et la puissance maximale à délivrer par packs sont déterminées par simulation en fonction des caractéristiques trouvées lors de l'optimisation (Chapitre 4). Connaissant le coût du kWh et du kW par composants, il devient possible d'en déduire la valeur en € d'un pack en fonction de l'énergie puis de la puissance. Le maximum de ces deux valeurs constitue le coût estimée du pack.

Le fait d'estimer un coût par pack permet d'en déduire la valeur de puissance maximale supportée par le(s) pack(s). Cette donnée est confidentielle. C'est pourquoi, tous les coûts des packs sont exprimés en fonction du coût du pack de l'**architecture 1** "batteries seules" (architecture 3.6). Ce coût est donné par la variable C par rapport à l'énergie à stocker ($\sim 700€/kWh$).

L'unique pack de cette architecture doit également supporter les demandes de puissances ($\sim 400€/kW$). Le coût, alors de ce système est estimé à : $8,5 \times C$.

Pour l'**architecture 2** (Figure 3.7), grâce au convertisseur DC/DC, l'énergie électrique à stocker est moindre. Mais le fait de devoir fournir toute la puissance au système, un nombre conséquent de batteries reste nécessaire. Donc, l'énergie maximale reste importante. On obtient un coût de remplacement de ce pack de : $0,95 \times C$.

Ne disposant pas d'un pack de supercondensateur, le coût final estimé en fonction de la puissance est de : $8,8 \times C$.

L'**architecture 3** (Figure 3.5) intègre un pack de supercondensateurs. Sur le plan de l'énergie à stocker, le coût du pack de batteries est évalué à : $0,3 \times C$ et le pack de supercondensateurs ($\sim 1000\text{€}/kWh$) à : $0,05 \times C$.

Par rapport à la puissance maximale devant être délivrée, on obtient, pour le pack de batteries : $2 \times C$, et pour le pack de supercondensateurs ($\sim 200\text{€}/kW$) : $4,3 \times C$.

Le coût total estimée pour cette architecture est de : $6,3 \times C$.

Sur le plan de l'énergie à stocker, le coût estimé pour l'**architecture 4** (Figure 3.3) pour les batteries est de : $0,85 \times C$ et pour les supercondensateurs : $0,05 \times C$.

Cette architecture nécessite un nombre important de supercondensateurs en série pour supporter la tension du bus. Malgré tout, lors d'une demande en puissance, le pack de batteries doit rapidement reprendre le relais sous peine d'instabilité en tension sur ce bus. C'est pourquoi, le coût sur le plan de la puissance à délivrer est, pour les batteries, de : $7 \times C$ et pour les supercondensateurs : $2 \times C$.

On obtient un coût total estimé de : $9 \times C$.

Pour l'**architecture 5** (Figure 3.4), le coût comparé à l'énergie à stocker pour le pack de batteries est estimé à : $1 \times C$ et pour le pack de supercondensateurs à $0,5 \times C$. Sur le plan coût en rapport à la puissance maximale à délivrer, pour le pack de batteries, on a : $6,5 \times C$ et pour le pack de supercondensateurs, on a : $1,5 \times C$.

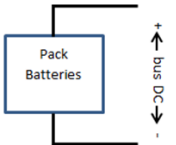
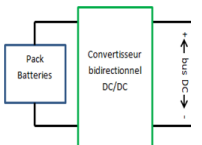
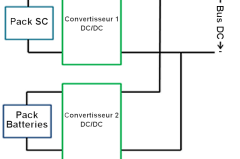
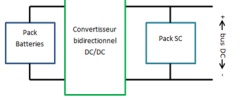
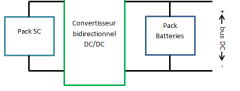
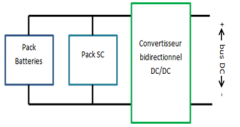
Soit un coût total estimé à : $8 \times C$.

Enfin, pour la dernière architecture (**architecture 6**), le stockage de l'énergie pour le pack de batteries, on obtient : $0,4 \times C$ et pour le pack de supercondensateurs $0,05 \times C$.

Le coût pour la puissance à délivrer est estimée respectivement pour les batteries et les supercondensateurs à : $2,5 \times C$ et $3,7 \times C$.

Soit un coût total de : $6,2 \times C$.

TABLE 3.5 – Synthèse de la durée de vie des batteries et du coût par architecture

Architectures	Durée de vie	Coût
Architecture 1 	7600× profils de mission	$8,5 \times C$
Architecture 2 	1900× profils de mission	$8,8 \times C$
Architecture 3 	1900× profils de mission	$6,3 \times C$
Architecture 4 	1900× profils de mission	$9 \times C$
Architecture 5 	7600× profils de mission	$8 \times C$
Architecture 6 	1900× profils de mission	$6,2 \times C$

6.7/ INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

Les tests effectués dans la thèse de N. Devillers [68] montre que le fonctionnement des batteries est altéré à température extrême. Les essais réalisés sur batteries Lithium-ion polymère au laboratoire CU-ICAR (Clemson University - International Center for Automotive Research) à Greenville, SC, États-Unis confirme cet état de fait.

Ainsi, la capacité de la batterie diminue lorsque la température ambiante augmente. À température élevée, l'énergie électrique stockée peut ne pas être suffisante pour remplir le profil de mission choisi (Figure 3.21).

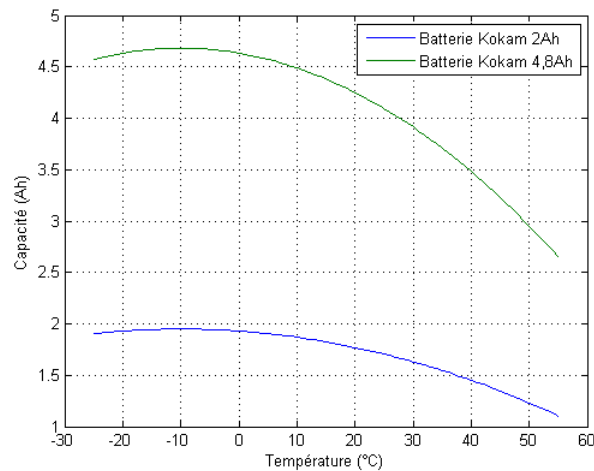


FIGURE 3.21 – Évolution de la capacité d'une batterie en fonction de la température

À basse température, la capacité n'est pas affectée, mais la résistance interne augmente exponentiellement. Ceci implique une chute de tension d'autant plus importante en sortie de batterie que le courant demandé peut être important (Figure 3.22).

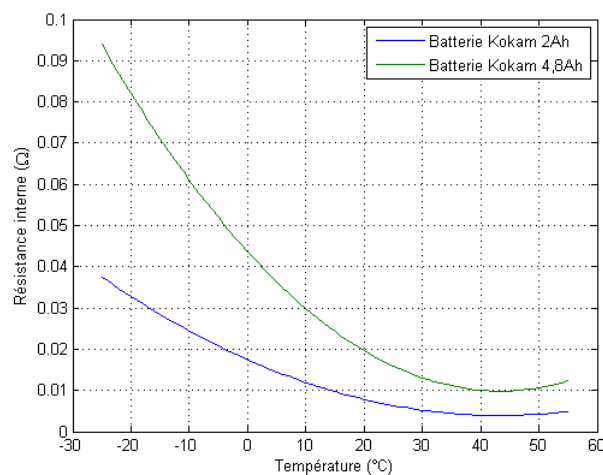


FIGURE 3.22 – Évolution de la résistance interne d'une batterie en fonction de la température

La plage de température est imposée par le cahier des charges. Le fonctionnement des supercondensateurs évolue peu en fonction de ces températures imposées. De ce fait, il peut être nécessaire de solliciter davantage les supercondensateurs pour pallier aux carences venant des batteries. Une autre solution consiste à couper certains circuits provenant de la charge non absolument indispensable au profil de mission de la phase de démarrage (tels que tous les circuits d'éclairage - habitacle, tableau de bord, feux de position ...).

7/ CONCLUSION SUR LES ARCHITECTURES EXISTANTES

Ce chapitre énonce les trois structures hybrides électriques sur lesquelles se basent la littérature. Ces structures nous ont permis de définir quatre montages utilisant un pack de batteries et un pack de supercondensateurs.

Le lien entre packs de composants se fait par l'intermédiaire d'un(des) convertisseur(s) Boost DC/DC. Ce type de convertisseur permet d'augmenter la valeur de tension de sortie des packs et, par contrôle, de réguler celle-ci à la valeur nominale du bus DC.

Par ce contrôle et par le biais d'un filtre passe-bas, certaines architectures permettent de solliciter davantage un pack ou l'autre. Cette redirection est faite en fonction des composants du pack ayant la fréquence de cycle la plus adaptée à notre demande. Les batteries prennent en charge les demandes de puissances aux fréquences inférieures à la fréquence de coupure du filtre, les supercondensateurs le reste.

Les packs de composants sont caractérisés par différentes variables discrètes :

- NP_{bat} et NS_{bat} représentant respectivement le nombre de batteries en parallèle et en série dans le pack.
- ou NP_{sc} et NS_{sc} représentant respectivement le nombre de supercondensateurs en parallèle et en série dans le pack.

Et par une structure de variables représentant les caractéristiques d'une cellule du pack (BAT pour les batteries et SC pour les supercondensateurs).

Les quatre systèmes hybrides trouvés, plus deux autres non hybrides, sont analysés en fonction de leur rendement, leur durée de vie, leur coût.

Les pertes de puissances des systèmes étudiées sont moindres pour l'architecture 5 (pack de batteries connecté au bus DC) (Figure 3.4). Il apparaît que la durée de vie de cette structure est également meilleure.

Le coût de remplacement des packs est moindre pour l'architecture 3 (pack de batteries couplé à un convertisseur et pack de supercondensateurs couplé à un convertisseur)(Figure 3.5).

S'agissant d'un aéronef, la stabilité de la tension de sortie du système semble primordiale. Mais également, la masse de l'ensemble ne peut être négligée. C'est pourquoi, une optimisation de cette dernière valeur est effectuée pour chacune des architectures citées dans ce paragraphe.

OPTIMISATION DE LA MASSE DES SYSTÈMES HYBRIDES

Le problème d'optimisation étudié est un problème de dimensionnement. Il s'agit de calculer le nombre de cellules en série et en parallèle pour des packs de batteries et de supercondensateurs. Ces packs doivent répondre à des besoins énergétiques spécifiques tout en respectant des contraintes imposées par l'environnement ou des contraintes technologiques. Le critère d'optimisation retenu est la masse car la densité d'énergie est primordiale dans les systèmes embarqués.

Pour présenter un modèle d'optimisation, il faut définir la fonction à optimiser. C'est ce qu'on appelle la **fonction-objectif**. Elle dépend de plusieurs variables qu'on appelle **variables d'optimisation**. Ces variables sont soumises au respect de différentes règles qu'on appelle **contraintes**.

Ce chapitre présente le modèle de minimisation de la masse d'un système hybride électrique en détaillant chacun de ces éléments, pour les différentes architectures étudiées précédemment.

1/ MODÈLE D'OPTIMISATION GÉNÉRAL

1.1/ FONCTION-OBJECTIF

La fonction-objectif à minimiser correspond à la masse totale du système, exprimée en gramme (*masse*). La masse totale du système comprend :

- la masse du pack de batteries ($masse_{pack_{bat}}$)
- la masse du pack de supercondensateurs ($masse_{pack_{sc}}$)
- la masse du convertisseur Boost DC/DC en sortie du pack de batteries ($masse_{conv_{bat}}$)
- la masse du convertisseur Boost DC/DC en sortie du pack de supercondensateurs ($masse_{conv_{sc}}$)

L'utilisation de convertisseurs Boost DC/DC est justifiée dans la partie 1.4.1.2

La masse du pack de batteries dépend du nombre de cellules en série NS_{bat} et du nombre de cellules en parallèle NP_{bat} et de la masse unitaire (en g) d'une cellule $masse_{bat}$.

$$masse_{pack_{bat}} = NS_{bat} \times NP_{bat} \times masse_{bat} \quad (4.1)$$

De la même manière, la masse du pack de supercondensateurs dépend de NS_{sc} , NP_{sc} et $masse_{sc}$.

$$masse_{pack_{sc}} = NS_{sc} \times NP_{sc} \times masse_{sc} \quad (4.2)$$

Le nombre de branches du convertisseur ($nbre_{branche_{bat}}$) relié en sortie du pack de batteries est fonction de la valeur du courant maximum délivré par celui-ci. Il en va de même pour le nombre de branches du convertisseur ($nbre_{branche_{sc}}$) relié en sortie du pack de supercondensateurs. Connaissant la masse d'une branche ($masse_{conv_{branche}}$), il est possible d'en déduire la masse du convertisseur Boost DC/DC ($masse_{conv}$).

$$masse_{conv} = (nbre_{branche_{bat}} + nbre_{branche_{sc}}) \times masse_{conv_{branche}} \quad (4.3)$$

1.2/ VARIABLES D'OPTIMISATION

Cette partie détaille les variables d'entrée de notre fonction-objectif. L'optimisation recherche les valeurs de ces variables pour lesquelles la fonction retourne une masse minimale.

1.2.1/ FRÉQUENCE DE COUPURE (f_c)

Notre aéronef dispose de deux bus à tension stabilisée (un bus DC de 1pu [V] haute tension et un bus DC de 28V basse tension). Le profil de courant le plus contraignant en énergie à stocker et en puissance à délivrer est celui de la phase de démarrage, sans apport de source électrique externe. De ces deux bus DC, il est possible d'en déduire un profil de puissance, (Figure 4.1). Notre système devra être capable d'y répondre sans oublier de tenir compte des $\sim 5\%$ de perte de puissance au niveau du convertisseur Boost DC/DC.

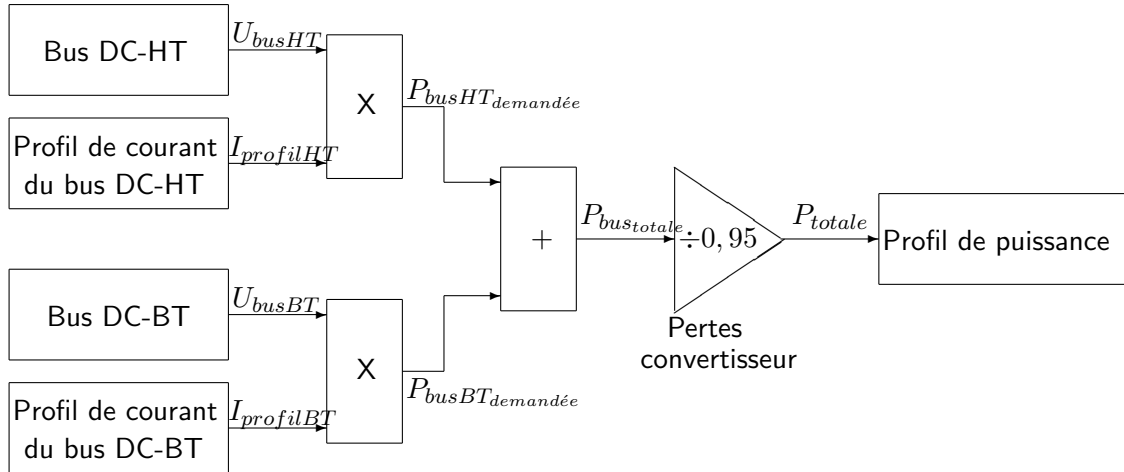


FIGURE 4.1 – Obtention du profil de puissance

Le nombre de cellules en série et en parallèle d'un pack dépend de l'énergie électrique à stocker ($W_{pack_{bat}}$ et $W_{pack_{sc}}$) et de la puissance maximale électrique à délivrer ($P_{pack_{bat}}$ et $P_{pack_{sc}}$). La répartition de l'énergie et de la puissance entre packs est régie par un filtre passe-bas de fréquence de coupure f_c [101] [108]. Aux fréquences les plus élevées, les supercondensateurs seront sollicités (demande de puissance instantanée) et à basse fréquence, les batteries (demande en énergie électrique).

On considère une plage de fréquence (en Hz) entre :

$$0.0001Hz \leq f_c \leq 0,1Hz \quad (4.4)$$

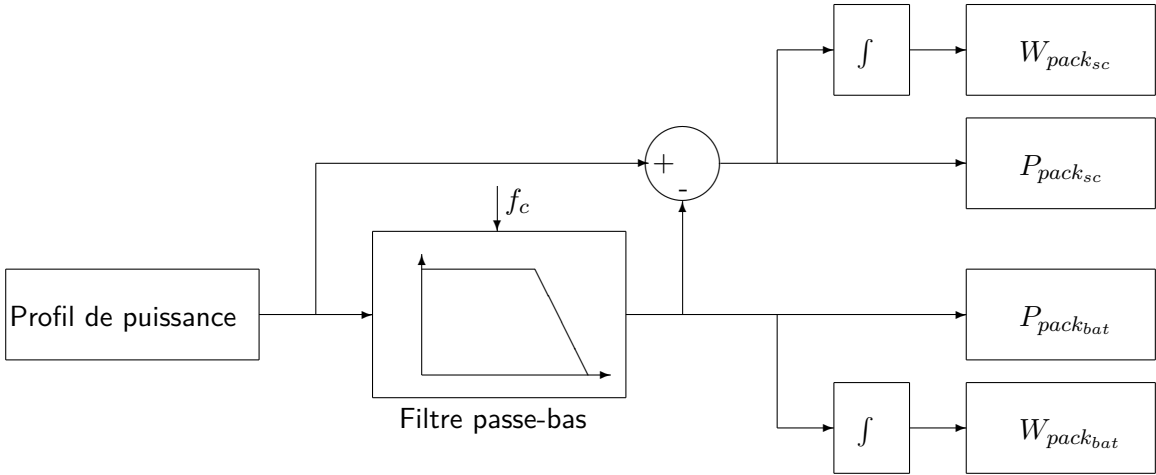


FIGURE 4.2 – Répartition de la demande de puissance et de l'énergie à stocker

1.2.2/ PROFONDEUR DE DÉCHARGE DES BATTERIES (DOD)

Les batteries tolèrent une profondeur de décharge maximale. Il s'agit de ne pas dépasser cette valeur sous peine de détérioration d'éléments du pack. Dans notre cas, on admettra une profondeur de décharge maximale tolérable de 0,9 (DOD_{max}).

La profondeur de décharge minimale de 0,25 est appliquée pour limiter l'espace de recherche de notre optimisation.

$$\begin{aligned} 0,25 &\leq DOD \leq 0,9 \\ \Rightarrow 0,1 &\leq (1 - DOD) \leq 0,75 \end{aligned} \quad (4.5)$$

1.2.3/ RATIO DE TENSION DES SUPERCONDENSATEURS (d_{sc})

Pour être sûr que le pack de supercondensateurs soit utilisé correctement, la valeur maximale de l'espace de recherche du ratio est fixée à 0,9.

La tension de sortie du pack de supercondensateurs ne doit pas descendre sous les 0.5pu sous peine de détérioration d'éléments du pack.

Mais, la valeur maximale que peut prendre la tension en sortie de pack ($U_{pack_{sc_{max}}}$) est égale à 0,88pu (Contraintes "a priori" - Paragraphe 1.4.1.2). La valeur minimale que peut prendre la tension en sortie de pack ($U_{pack_{sc_{min}}}$) est égale à 0,5pu (Contraintes "a posteriori" - Paragraphe 1.4.2.2).

Notre ratio de tension des supercondensateurs est donc compris entre :

$$\begin{aligned} \frac{U_{pack_{sc_{min}}}}{U_{pack_{sc_{max}}}} &= \frac{0,5}{0,88} \leq d_{sc} \leq 0,9 \\ \Rightarrow &\approx 0,56 \leq d_{sc} \leq 0,9 \end{aligned} \quad (4.6)$$

1.2.4/ CARACTÉRISTIQUES DES CELLULES

Dans notre modèle, nous utilisons des cellules existantes de batteries et de supercondensateurs dont les caractéristiques reposent sur des modèles quasi-statiques.

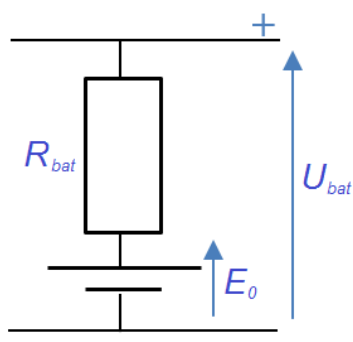


FIGURE 4.3 – Modèle quasi-statique de batterie

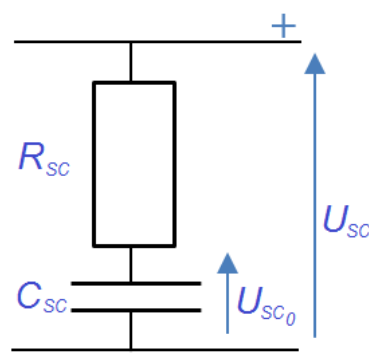


FIGURE 4.4 – Modèle quasi-statique de supercondensateur

Les valeurs possibles pour la résistance interne et la capacité sont prises de données constructeurs (Tables 4.1 et 4.2). L'ensemble des caractéristiques des batteries est regroupé dans la variable d'optimisation notée **BAT** et des supercondensateurs sous le terme **SC**. Les valeurs des différentes caractéristiques sont données au chapitre 3-tableaux 3.1,3.2.

TABLE 4.1 – Liste des caractéristiques de batteries regroupées dans la variable **BAT**

Caractéristiques à 25 ° C	Unité utilisée
Capacité nominale : $C_{bat_{25^{\circ}C}}$	Ah
Résistance interne : $R_{bat_{25^{\circ}C}}$	mΩ
Tension nominale : U_{bat}	V
Tension maximale : $U_{bat_{max}}$	V
Courant maximum : $I_{bat_{max}}$	A
Masse de la batterie : m_{bat}	g
Volume de la batterie : vol_{bat}	dm ³
Puissance maximale : $P_{bat_{max}}$	W
Puissance massique maximale : $P_{bat_{max}}^*$	W/g
Énergie maximale stockée : $W_{bat_{max}}$	Wh
Densité massique d'énergie : $W_{bat_{max}}^*$	Wh/kg

TABLE 4.2 – Liste des caractéristiques de supercondensateurs regroupées dans la variable **SC**

Caractéristiques à 25 °C	Unité utilisée
Capacité nominale : $C_{sc25^{\circ}C}$	F
Résistance interne : $R_{sc25^{\circ}C}$	$m\Omega$
Tension nominale : U_{sc}	V
Tension maximale : U_{scmax}	V
Courant maximum : I_{scmax}	A
Masse du supercondensateur : m_{sc}	g
Volume du supercondensateur : vol_{sc}	dm^3
Puissance maximale : P_{scmax}	kW
Puissance massique maximale : P_{scmax}^*	kW/kg
Énergie maximale stockée : W_{scmax}	Wh
Densité massique d'énergie : W_{scmax}^*	Wh/kg

1.2.5/ TEMPÉRATURE (T)

Nous avons décidé d'inclure la température ambiante (T) comme variable d'optimisation. Ainsi, le fonctionnement est optimum à la température déterminée par l'optimisation. Par la suite, on détermine les puissances maximales et énergies stockées en fonction de la température. Il est alors possible de connaître le délestage de puissance à effectuer (déconnexion de l'appareillage non indispensable) en fonction de la température ambiante lors de la phase de démarrage. La plage de température imposée par le cahier des charges est comprise entre :

$$-25^{\circ}C \leq T \leq 55^{\circ}C \quad (4.7)$$

Les valeurs constructeurs des tables 4.1 et 4.2 sont données pour une température ambiante de 25 °C.

Dans la thèse de Nathalie Devillers [68], il a été réalisé une approximation ("fitting") des valeurs des différents types de composants en fonction de la température. Il est donc possible de connaître les valeurs des caractéristiques constructeurs qui nous seront utiles en fonction de la température.

Pour les batteries, on a :

— une résistance interne en fonction de la température égale à :

$$R_{bat} = R_{bat25^{\circ}C} \times ((0,0009 \times T^2) - 0,002 \times T + 0,9651) \quad (4.8)$$

— une capacité en fonction de la température égale à :

$$C_{bat} = C_{bat25^{\circ}C} \times ((-10^{-5} \times T^2) - 0,078 \times T + 2,1827) \quad (4.9)$$

Pour les supercondensateurs, on a :

— une résistance interne en fonction de la température égale à :

$$R_{sc} = R_{sc25^{\circ}C} \times ((0,0001 \times T^2) - 0,0097 \times T + 1,1567) \quad (4.10)$$

1.3/ COMPLÉMENT SUR LA FONCTION-OBJECTIF

En conclusion la fonction-objectif s'exprime de la manière suivante :

$$masse = masse_{bat}(f_c, DOD, T, BAT) + masse_{sc}(f_c, d_{sc}, T, SC) + masse_{conv}$$

avec $masse_{bat}$: fonction renvoyant la masse du pack de batteries.
 $masse_{sc}$: fonction renvoyant la masse du pack de supercondensateurs.
 $masse_{conv}$: fonction renvoyant la masse du/des convertisseurs.

Pour des solutions de packs de masse totale équivalente, on souhaite privilégier la solution pour laquelle la température est minimale. Cette stratégie est réalisée en pénalisant la fonction-objectif avec un terme βT . Le poids β est choisi judicieusement de manière à ce que la température impacte au plus la masse totale de 1 g.

La fonction-objectif devient :

$$masse = masse_{bat}(f_c, DOD, T, BAT) + masse_{sc}(f_c, d_{sc}, T, SC) + masse_{conv} + \beta T \quad (4.11)$$

1.4/ CONTRAINTES

Cette partie présente les différentes contraintes électriques auxquelles doit répondre notre système.

Certaines peuvent être prises en compte directement dans notre modèle d'optimisation (ce sont les contraintes a priori). D'autres contraintes sont vérifiées a posteriori, elles nécessitent la simulation (avec Matlab-Simulink) du système pour savoir si la solution trouvée les respecte.

1.4.1/ CONTRAINTES "A PRIORI"

Les contraintes "a priori" permettent de déterminer une première série de limites sur les caractéristiques des packs, au-delà desquelles le système ne pourra fonctionner.

1.4.1.1/ CONTRAINTES SUR L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE À STOCKER

La demande de puissance est répartie sur chacun des packs par le biais du filtre passe-bas. Les puissances demandées à chaque pack sur l'ensemble du profil nous permettent de trouver l'énergie minimale à stocker par ceux-ci $W_{pack_{bat_{min}}}$ et $W_{pack_{sc_{min}}}$ (Figure 4.2). On a :

$$W_{pack_{bat_{min}}} = \int P_{pack_{bat}}.dt \quad (4.12)$$

$$W_{pack_{sc_{min}}} = \int P_{pack_{sc}}.dt \quad (4.13)$$

Connaissant l'énergie maximale pouvant être stockée par composant ($W_{bat_{max}}$ - Tableau 4.1), ($W_{sc_{max}}$ - Tableau 4.2), la profondeur de décharge maximale tolérable pour les batteries ($DOD_{bat_{max}}$ - Partie "Profondeur de décharge des batteries (DOD)" 1.2.2) et le ratio de tension minimum tolérable pour les supercondensateurs ($d_{sc_{min}}$ - Partie "Ratio de tension des supercondensateurs (d_{sc})" 1.2.3), il est possible de déterminer les quantités d'énergie maximale restituable par composant ($W_{bat_{utile_{min}}}$ et $W_{sc_{utile_{min}}}$).

$$W_{bat_{utile_{max}}} = W_{bat_{max}} \times DOD_{max} \quad (4.14)$$

$$W_{sc_{utile_{max}}} = W_{sc_{max}} \times (1 - d_{sc_{min}}^2) \quad (4.15)$$

Finalement, les deux profils de courant les plus contraignants, permettent de déterminer l'énergie que chacun des packs doit stocker ($W_{pack_{bat_{min}}}$ et $W_{pack_{sc_{min}}}$). Il est alors possible de déterminer le nombre minimum de cellules dans le pack ($N_{bat_{min}}$ pour les batteries et $N_{sc_{min}}$ pour les supercondensateurs) en-dessous duquel le système ne peut fonctionner.

$$N_{bat_{min}} = \left\lceil \frac{W_{pack_{bat_{min}}}}{W_{bat_{utile_{max}}}} \right\rceil \quad (4.16)$$

$$N_{sc_{min}} = \left\lceil \frac{W_{pack_{sc_{min}}}}{W_{sc_{utile_{max}}}} \right\rceil \quad (4.17)$$

1.4.1.2/ CONTRAINTES SUR LA TENSION INITIALE

La tension délivrée par les packs n'est pas constante. Elle est fonction de l'état de charge des cellules. La tension délivrée au bus DC de l'aéronef doit nécessairement être constante et cela quelque soit la puissance demandée par l'appareillage qui y est connecté. Pour cette raison, la connexion électrique entre packs et bus DC se fera par l'intermédiaire de convertisseurs Boost (Figure 4.5).

Ces convertisseurs doivent toujours fonctionner en mode élévateur de tension ($\frac{1}{1-\alpha} \geq 1 \Rightarrow 0 \leq \alpha < 1$).

D'après le cahier des charges, la tension minimale acceptable sur le bus DC est de 0,88pu. Ainsi, la tension maximale en sortie des packs à pleine charge est, au plus égale, à 0.88pu.

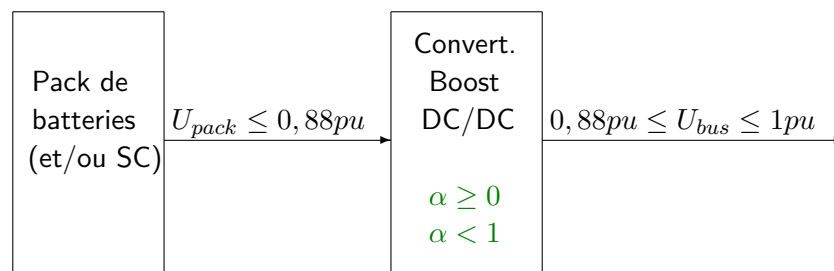


FIGURE 4.5 – Tension maximale en sortie de pack

Les convertisseurs Boost fonctionnant en élévateur de tension, la sortie des packs ne doit pas excéder les 0,88pu ($U_{pack_{max}} \leq 0,88pu$).

Connaissant la tension maximale aux bornes d'une cellule ($U_{bat_{max}} = 4,2V$ pour les batteries - Tableau 4.1), ($U_{sc_{max}} = 2,8V$ pour les supercondensateurs - Tableau 4.2), on peut en déduire le nombre maximum de composants en série ($NS_{bat_{max}}$ et $NS_{sc_{max}}$).

Pour les batteries :

$$NS_{bat_{max}} = \left\lfloor \frac{0,88pu}{U_{bat_{max}}} \right\rfloor \quad (4.18)$$

Pour les supercondensateurs :

$$NS_{sc_{max}} = \left\lfloor \frac{0,88pu}{U_{sc_{max}}} \right\rfloor \quad (4.19)$$

1.4.1.3/ NOMBRE MINIMUM DE BRANCHES EN PARALLÈLE

Connaissant les nombres minimum de cellules par pack (équations : 4.16 et 4.17) et maximum en série (équations : 4.18 et 4.19), il est possible de déterminer un premier nombre minimum de branches en parallèle ($NP_{bat_{min}}$ et $NP_{sc_{min}}$). Cette dernière valeur peut ne pas être suffisante pour remplir les conditions de courant à supporter, mais il est certain que le système n'est pas fonctionnel pour des valeurs inférieures.

$$NP_{bat_{min}} = \left\lceil \frac{N_{bat_{min}}}{NS_{bat_{max}}} \right\rceil \quad (4.20)$$

$$NP_{sc_{min}} = \left\lceil \frac{N_{sc_{min}}}{NS_{sc_{max}}} \right\rceil \quad (4.21)$$

1.4.2/ CONTRAINTES "A POSTERIORI"

On résout notre problème d'optimisation en tenant compte des contraintes explicites (contraintes a priori). La solution obtenue est analysée à l'aide d'un schéma Matlab-Simulink qui simule le comportement du système sur l'ensemble du profil. Nous vérifions si la solution obtenue satisfait les contraintes supplémentaires (contraintes a posteriori).

Si ce n'est pas le cas, la solution est rejetée. Pratiquement, on associe à cette solution une valeur de fonction-objectif très élevée.

1.4.2.1/ CONTRAINTES SUR LE COURANT MAXIMUM DEMANDÉ

A partir des puissances délivrées par chacun des packs ($P_{pack_{bat}}$ et $P_{pack_{sc}}$ - Figure 4.2), il doit être possible de connaître les profils de courant et donc le courant maximum demandé aux packs.

$$I_{profil} = \frac{P_{pack}}{U_{pack}} \text{ et } I_{profil_{max}} = \max(I_{profil})$$

Problème :

Comme vu dans le paragraphe 1.4.1.2, la tension en sortie des packs n'est pas constante sur l'ensemble du profil. Elle est fonction de l'état de charge des cellules donc du courant qui a déjà été demandé durant ce même profil.

La variation du courant n'est pas proportionnelle à la variation de puissance (Figure 4.6).

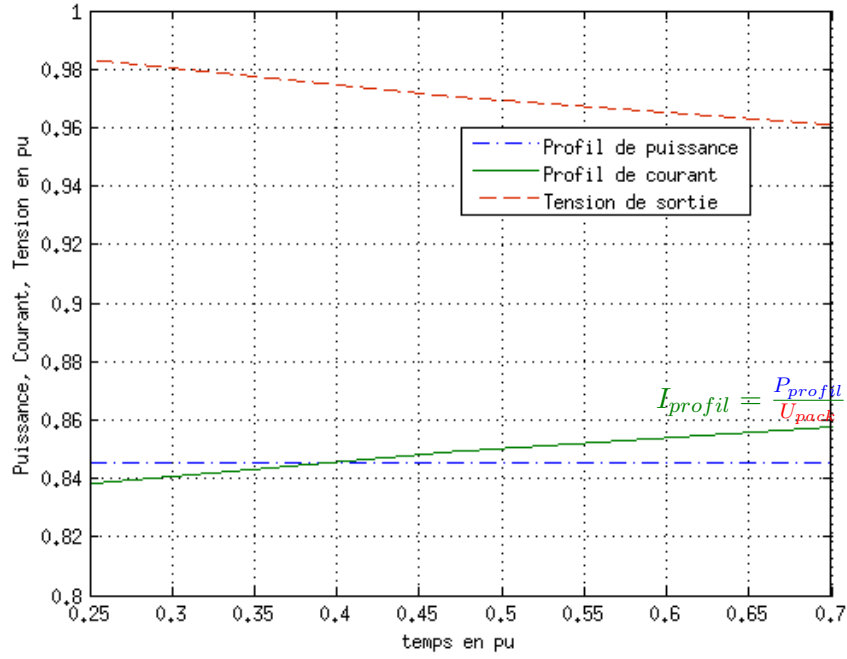


FIGURE 4.6 – Évolution du profil de courant en fonction du profil de puissance sur une partie du temps de simulation

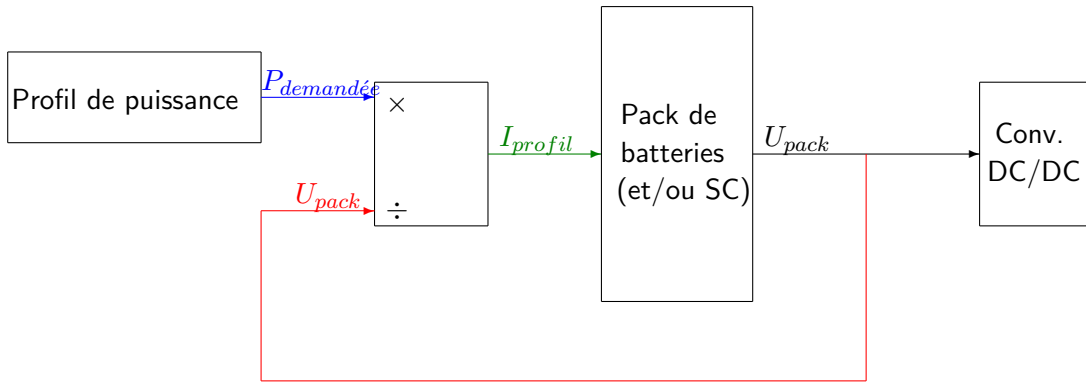


FIGURE 4.7 – Obtention du profil de courant - Réalisé sous Matlab-Simulink

Un retour de la valeur de la tension de sortie du pack (figure 4.7) permet de définir le courant de profil ($I_{profil} = \frac{P_{profil}}{U_{pack}}$). Ainsi, il est possible de définir sa valeur maximale ($I_{profil_{max}} = \max(I_{profil})$) et donc de vérifier si les caractéristiques du pack testée (NP_{bat} ou NP_{sc}) répondent à cette contrainte "a posteriori". Les courants maximum ($I_{bat_{max}}$ et $I_{sc_{max}}$) tolérés par les cellules sont trouvés dans les tableaux constructeurs 4.1 et 4.2

$$NP_{bat} \geq \left\lceil \frac{I_{profil_{max}}}{I_{bat_{max}}} \right\rceil \quad (4.22)$$

$$NP_{sc} \geq \left\lceil \frac{I_{profil_{max}}}{I_{sc_{max}}} \right\rceil \quad (4.23)$$

1.4.2.2/ CONTRAINTES SUR LA TENSION MINIMALE DE SORTIE D'UN PACK

Sachant que la tension en sortie de pack n'est pas constante, il est défini que pour maintenir sur le bus DC une tension parfaitement stable, le coefficient multiplicateur du convertisseur Boost ne doit pas excéder la valeur de 2 (Paragraphe 5.2). La tension nominale du bus DC est de 1pu. Donc, on a pour valeur minimale admissible en sortie de pack : $U_{pack_{min}} = \frac{1pu}{2} = 0,5pu$. C'est à dire : $(\frac{1}{1-\alpha} \geq 2 \Rightarrow \alpha \leq 0,5)$.

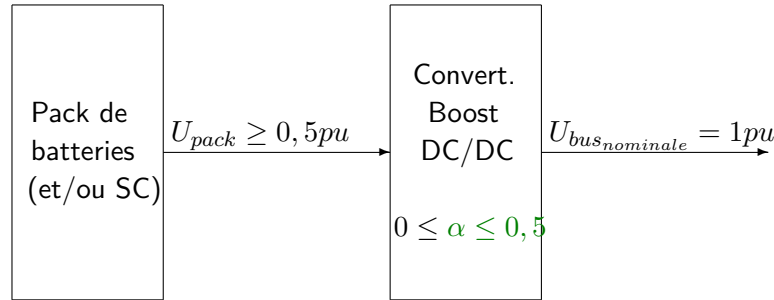


FIGURE 4.8 – Tension minimale en sortie de pack

La vérification du respect de cette contrainte nécessite de lancer la même simulation sous Matlab-Simulink que précédemment. Effectivement, la tension de sortie U_{pack} est fonction des caractéristiques du pack et du profil de courant demandée. Il est possible de déterminer si notre structure de pack ne descend pas sous la tension minimale fixée de 0,5pu Uniquement en fin de simulation.

$$U_{pack_{bat_{min}}} \geq 0,5pu \quad (4.24)$$

$$U_{pack_{sc_{min}}} \geq 0,5pu \quad (4.25)$$

1.4.2.3/ CONTRAINTES VENANT DU CONVERTISSEUR BOOST DC/DC

Le convertisseur Boost DC/DC, déjà en place, comporte 3 branches chacune capable de supporter une même puissance maximale de $P_{\frac{1}{3}conv_{max}}$. Ainsi, la puissance maximale fournie par pack ne peut être répartie (Figure 4.9) que de la manière suivante :

- $(2 \times P_{\frac{1}{3}conv_{max}})$ pour le pack de batteries et $(1 \times P_{\frac{1}{3}conv_{max}})$ pour le pack de supercondensateurs.
- ou
- $(1 \times P_{\frac{1}{3}conv_{max}})$ pour le pack de batteries et $(2 \times P_{\frac{1}{3}conv_{max}})$ pour le pack de supercondensateurs.

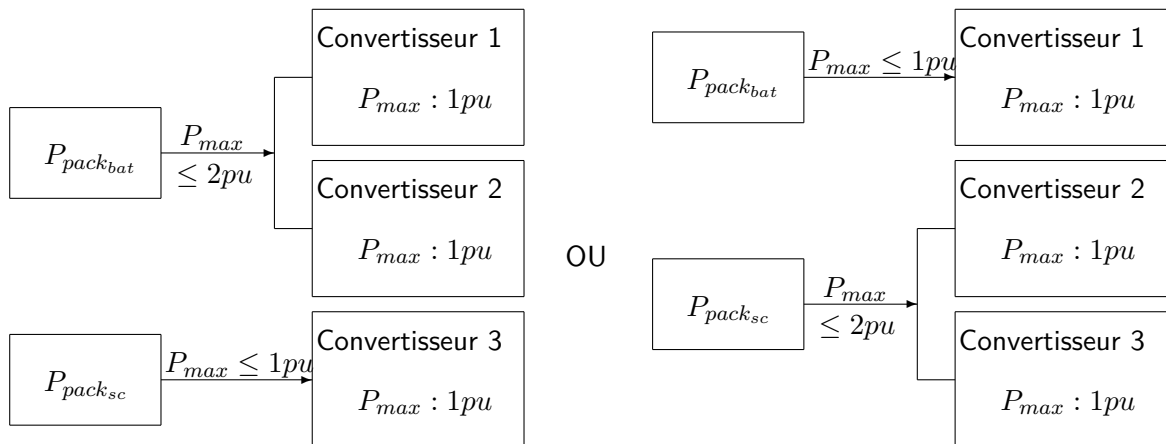


FIGURE 4.9 – Répartition des puissances fournies par les packs sur le convertisseur Boost DC/DC

Pour valider cette contrainte "a posteriori", il faut qu'une puissance maximale délivrée par un pack soit inférieure à 2pu et l'autre, inférieure à 1pu.

De plus, le convertisseur Boost DC/DC utilisé a une puissance massique de 2,5 kW/kg (Paragraphe 5.4). La puissance maximale que doit fournir chaque pack ($P_{pack_{bat_{max}}}$ et $P_{pack_{sc_{max}}}$) est connue. Ce sont ces valeurs qui vont nous permettre d'estimer une masse des convertisseurs ($masse_{conv_{bat}}$ et $masse_{conv_{sc}}$) pour chacun des packs :

$$masse_{conv_{bat}} = \frac{P_{pack_{bat_{max}}}}{2,5} \quad (4.26)$$

$$masse_{conv_{sc}} = \frac{P_{pack_{sc_{max}}}}{2,5} \quad (4.27)$$

2/ MÉTHODE DE RÉOLUTION

Pour chacune des **combinaisons**² possibles de composants, l'algorithme d'optimisation fournit une solution **admissible**³ qui minimise la masse totale du système.

On retient la combinaison qui fournit la masse la plus faible, ainsi que les valeurs associées.

2.1/ ALGORITHME DE RECHERCHE DE SOLUTIONS OPTIMALES

Descriptif : On calcule la masse minimale $m(i)$ du système que l'on peut obtenir pour chaque combinaison(i) et on retient la valeur minimale des masses trouvées m^* , ainsi que les variables d'optimisation, caractéristiques de packs, caractéristiques de cellules associées ($valeurs_associées = [(f_c, DOD, d_{sc}, T), (NP_{bat}, NS_{bat}, NP_{sc}, NS_{sc}), (BAT, SC)]$).

2. Une combinaison est un couple de cellules (BAT, SC). Par exemple une batterie Kokam 2Ah avec un supercondensateur de 650F.

3. Une solution admissible vérifie l'ensemble des contraintes.

Algorithme 1 Recherche de solution optimale

{Pour utiliser au maximum les possibilités du processeur, la recherche de masses minimales pour chaque combinaison est répartie entre les cœurs du processeur. En travaillant sur les 4 cœurs disponibles, ce calcul en parallèle permet un gain de temps d'environ 60% ⁴}

{Le symbole * désigne le minimum}

Entrée: L'ensemble de combinaisons possibles entre les caractéristiques de batteries BAT et de supercondensateurs SC

Sortie: La masse optimum m^* avec les valeurs associées $valeurs_associées^*$

```

{INITIALISATION}
{La masse optimale de départ est initialisée à une très grande valeur}
 $m^* \leftarrow +\infty$ 

{PROGRAMME}
Pour tout(e) combinaison  $i$  ( $[BAT, SC]^{(i)}$ ) faire

     $[m^{(i)}, valeurs\_associées^{(i)}] \leftarrow optimisation\_masse([BAT, SC]^{(i)})$ 

    {Si la masse trouvée est inférieure à la masse optimale}
    Si  $m^{(i)} < m^*$  Alors
        {Alors conserver sa valeur et valeurs associées comme nouvel optimum}
         $m^* \leftarrow +m^{(i)}$ 
         $valeurs\_associées^* \leftarrow +valeurs\_associées^{(i)}$ 
    Fin Si

Fin Pour

```

La procédure *optimisation_masse* calcule les valeurs optimales des différents paramètres (f_c , DOD , d_{sc} , T) de manière à obtenir une solution réalisable/admissible qui vérifie les contraintes "a priori" et "a posteriori" (par la simulation du système) et qui minimise la masse du système pour la combinaison donnée.

2.2/ RECHERCHE DE SOLUTIONS ADMISSIBLES DE MASSE MINIMALE

La procédure "*optimisation_masse*" recherche pour une combinaison de type de cellules, le meilleur pack de batteries et de supercondensateurs possible. Le nombre en série et en parallèle

4.

Outils utilisés :	- ordinateur portable HP ZBook (Intel CORE i7 - 4 cœurs)
	- mesocentre de Besançon
Moyens de calcul :	- Matlab et Simulink 2014b
	- Toolbox de Matlab " <i>parfor</i> " (<i>parallel for</i>) :
	Les itérations de la boucle " <i>Pour tout(e)</i> " de l'algorithme 1 s'exécutent en parallèle sur les cœurs du processeur.
Durée de d'optimisation :	de 4 heures pour l'architecture la plus simple (pack de batteries seules à 12 heures pour l'architecture la plus complète (2 packs avec 2 convertisseurs).

de cellules des deux packs respectant l'ensemble des contraintes (a priori et a posteriori) et minimisant la masse totale du système, s'obtient par la démarche suivante.

Dans un premier temps, des matrices-produit MP_{bat} et MP_{sc} sont définies (Figure 4.10) pour chaque pack. Les colonnes représentent le nombre de cellules en série. Les lignes représentent le nombre de cellules en parallèle (nombre de branches). Les valeurs de la matrice représentent le nombre de cellules.

Les bornes du nombre de branches en parallèle sont fixées comme suit :

- La valeur minimale est déterminée par la contrainte "a priori" du nombre de composants en parallèle minimum $NP_{bat_{min}}$ et $NP_{sc_{min}}$ (Paragraphe 1.4.1.3).
- La valeur maximale est estimée de manière à avoir systématiquement une solution, sans être déraisonnable : $NP_{bat_{max}} = NP_{sc_{max}} = 30$

Les bornes du nombre de cellules en série sont définies ainsi :

- Une contrainte "a posteriori" impose une tension de sortie de pack supérieure à 0,5pu. Cette contrainte nous indique un nombre minimum de cellules en série, sous laquelle on ne peut descendre. Pour les batteries, sur tout le profil, il faut que :

$$NS_{bat} \times U_{bat} \geq 0.5pu$$

$$\Rightarrow NS_{bat} \geq \frac{0.5pu}{U_{bat}}$$

$$\Rightarrow NS_{bat_{min}} = \left\lceil \frac{0.5pu}{U_{bat_{max}}} \right\rceil$$

Ainsi que pour les supercondensateurs :

$$NS_{sc} \times U_{sc} \geq 0.5pu$$

$$\Rightarrow NS_{sc} \geq \frac{0.5pu}{U_{sc}}$$

$$\Rightarrow NS_{sc_{min}} = \left\lceil \frac{0.5pu}{U_{sc_{max}}} \right\rceil$$

- La valeur maximale est déterminée par la contrainte "a priori" du nombre de composants en série maximum $NS_{bat_{max}}$ et $NS_{sc_{max}}$ (Équations 4.18, 4.19).

On obtient la matrice suivante :

(NS_{min} , NS_{max} , NP_{min} et NP_{max} représentent le nombre de cellules en série et en parallèle pour un pack de batteries ou un pack de supercondensateurs)

		Nombre de cellules en série				
		NS_{min}	$NS_{min} + 1$	...	...	NS_{max}
NP_{min}	Nombre de branches	$\begin{bmatrix} NP_{min} \times NS_{min} & \dots & \dots & \dots & NP_{min} \times NS_{max} \\ \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ NP_{max} \times NS_{min} & \dots & \dots & \dots & NP_{max} \times NS_{max} \end{bmatrix}$				
NP_{max}						

FIGURE 4.10 – Matrice produit MP_{bat} et MP_{sc}

Il nous reste à prendre en compte la contrainte "a priori" sur le nombre de cellules minimales nécessaires $NS_{bat_{min}}$ et $NS_{sc_{min}}$ (Paragraphe 1.4.1.1).

Les valeurs supérieures à N_{min} sont classées par ordre croissant et sauvegardées dans un vecteur VP . Il s'agit de sélectionner une solution admissible avec un nombre minimum de cellules et, par conséquent, une masse minimale (Equations 4.1 et 4.2).

$$VP = \begin{bmatrix} VP^{(1)} & \dots & \dots & VP^{(n)} = NP_{max} \times NS_{max} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

avec $VP^{(1)}$: 1^{re} valeur de la matrice MP supérieure ou égale à N_{min}

Les éventuelles solutions représentées dans le vecteur VP sont testées les unes après les autres jusqu'à trouver la première qui respecte toutes les contraintes "a posteriori".

Ceci est réalisé pour le pack de batteries, puis pour le pack de supercondensateurs. Ainsi les deux structures de packs trouvées ($NP_{bat} \times NS_{bat}$ et $NP_{sc} \times NS_{sc}$) représentent la solution admissible de la combinaison de cellules BAT et SC .

Pour vérifier le respect de ces contraintes, il est nécessaire de lancer des simulations sous Matlab-Simulink. Les temps de simulation peuvent être prohibitifs.

À savoir que le temps moyen de l'ouverture d'un fichier Simulink peut aller jusqu'à 20 secondes. Une optimisation nécessite l'ouverture de trois de ces fichiers. Ensuite, ceux-ci sont mis en mémoire. Son temps d'accès ne dure plus qu'environ trois secondes. Toutefois, le nombre de test de solutions éventuelles reste important.

La méthode énoncée permet de limiter le nombre d'appels à Matlab-Simulink.

2.3/ MÉTHODE D'OPTIMISATION UTILISÉE

Le problème d'optimisation de la masse du système fait appel à la minimisation d'une fonction-objectif (Équation 4.11) non linéaire dépendant de plusieurs variables d'optimisation discrète (BAT , SC) et continues (f_c , DOD , d_{sc} , T). Cette fonction ne présente pas de propriété particulière remarquable (type convexité). La fonction admet donc un minimum global ainsi que des minima locaux. Pour les trouver, il paraît judicieux de se tourner vers des méthodes d'optimisation stochastique (type recuit simulé, algorithme génétique,...) qui consiste, à partir d'une solution admissible, à parcourir l'espace de recherche pour trouver un minimum local.

L'appel à une méthode stochastique doit être réalisé plusieurs fois avec des solutions de départ différentes de manière à balayer convenablement l'espace de recherche et trouver plusieurs solutions intéressantes. Les solutions sont ensuite analysées plus précisément avec la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) pour être validé ou rejeté.

Enfin, il est intéressant et nécessaire de connaître les applications possibles énoncées dans la littérature. La partie suivante présente un état de l'art des différentes méthodes d'optimisation envisagées pour la résolution de notre problème.

3/ OPTIMISATION : ÉTAT DE L'ART

Dans la littérature, il est possible de trouver un grand nombre de méthodes permettant de trouver l'optimum d'une fonction sur un ensemble défini.

Parmi les méthodes de résolution d'optimisation possibles pour traiter notre problème, nous

avons retenu les plus classiques qui sont le recuit simulé et les algorithmes génétiques.

- L'optimisation par **recuit simulé** est inspirée d'un processus utilisé en métallurgie. Le but étant d'améliorer la qualité d'un matériau.

Le principe est de rechercher un état d'énergie minimale qui correspond à un état stable du métal. En partant d'une haute température pour laquelle la matière est à l'état liquide et en suivant une évolution choisie de baisse de température, la matière retrouve sa forme solide.

À l'état liquide, les particules sont disposées de manière aléatoire. Puis, par descente lente de la température, le métal retrouve progressivement son état solide. Ainsi, les particules de celui-ci vont s'agencer de manière similaire à celle d'un cristal. Habituellement, la baisse de température se fait par palier, permettant au matériau de trouver son équilibre thermique (état optimale pour une température donnée) [7]. Des expériences ont été réalisées dans ce sens par Metropolis et al. pour simuler l'évolution de ce processus [1].

Cette méthode permet d'obtenir de bonnes solutions à des problèmes d'optimisation difficiles. L'intérêt a commencé avec les travaux de Kirkpatrick et al. en 1983 [2] et Cerny en 1985 [4]. Ils ont utilisé un premier modèle simulant le recuit des solides. Il s'agit de la première méta-heuristique proposée.

Il est possible de faire une analogie entre le recuit physique et la résolution de problèmes d'optimisation (Tableau 4.3).

Recuit physique	Recuit simulé
État du métal à une énergie donnée	Solution possible (S) à une température θ
Énergie d'un état	Valeur de la fonction-objectif ($E = f(S)$) calculée pour une solution (S)
Refroidissement du métal	Évolution de la température θ
Stabilisation de la température du métal	Recherche d'un nouvel optimum en partant de la solution précédente (équilibre thermique)
État à l'énergie minimale	Solution (S^*) donnant le minimum global du problème
Énergie en fin de recuit	Valeur de la fonction-objectif (E^*) calculée pour la solution optimale(S^*)

TABLE 4.3 – Analogie entre le recuit physique et le recuit simulé

Le recuit simulé est utilisé pour de nombreuses applications récentes dont la restauration d'image, le routage, la conception de code pour les systèmes de communication et certains aspect de l'intelligence artificielle [5].

Cette méthode est également fréquemment utilisée pour des problèmes de gestion d'énergie. On peut citer, la maximisation du rendement de ressources énergétiques renouvelables venant de panneaux solaires [99], la disposition d'éoliennes dans un

parc pour augmenter la production d'énergie électrique [44] ou encore la conception d'une gestion intelligente de ressources énergétiques entre un véhicule électrique et le réseau [70].

Le principe de fonctionnement du recuit simulé utilisé par Matlab est expliqué dans le paragraphe 4. Plus de détails sont donnés dans la thèse de K. Deschinkel [16] (pages 87 à 91).

- Les **algorithmes génétiques** sont le résultat de recherches de John Holland et de ces collègues dès 1960. Leur popularité est attribuée à David Golberg grâce à son livre "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning" [6]. Ces algorithmes génétiques utilisent le principe de l'évolution d'une population, génération après génération. A chaque changement de générations et en fonction des conditions fixées par la fonction-objectif, les individus les plus résistants ont davantage de chances de survie.

On retrouve plusieurs exemples d'application des algorithmes génétiques pour des problèmes de gestion d'énergie.

En prenant en compte la dégradation des composants d'un système hybride de pack de batteries et de pack de supercondensateurs, et les performances nécessaires du tramway de Séville dans les zones sans caténaire, une analyse a été effectuée avec comme variable à optimiser le dimensionnement de ces packs. L'objectif de ce travail étant de minimiser le coût d'exploitation du système [89].

Il existe d'autres études semblables, notamment sur un bus électriques hybrides alliant toujours des batteries et des supercondensateurs [88] ou sur un véhicule solaire hybride regroupant moteurs thermiques, batteries et cellules photovoltaïques [43].

Les systèmes dits stationnaires utilisent aussi ce type d'optimisation. L'utilisation d'énergie renouvelable fournie par des panneaux photovoltaïques et solaires dans les maisons individuelles ou immeubles nécessitent toujours un appoint venant du réseau. Dans ce cas, il s'agit d'en limiter la consommation [90].

Les deux parties suivantes détaillent les procédures du recuit simulé, des algorithmes génétiques implémentés dans Matlab et leur paramétrage pour notre problème.

4/ MÉTHODE D'OPTIMISATION DU RECUIT SIMULÉ

4.1/ PRINCIPE DU RECUIT SIMULÉ

L'idée est de partir d'un point initial choisi aléatoirement et de parcourir l'espace de recherche voisins en voisins. Outre le fait que les meilleurs voisins sont systématiquement gardés, les autres ont une probabilité plus ou moins importante d'être retenus en fonction de leur énergie (valeur prise par la fonction-objectif).

De plus, un paramètre, appelé température (θ), évolue par rapport à une courbe établie à l'avance. Plus la valeur θ est importante, plus la probabilité de retenir un "moins bon" voisin est importante. En faisant baisser cette température, les chances diminuent.

Cette probabilité est calculée en fonction de la différence entre les énergies des deux points S et S^* ($\Delta E = E - E^*$, avec E : énergie du voisin S et E^* : énergie du point optimum actuel S^*) et le niveau de température θ (Équation 4.29 et Figure 4.11) :

$$Probabilité = \exp \frac{-\Delta E}{\theta} \quad (4.29)$$

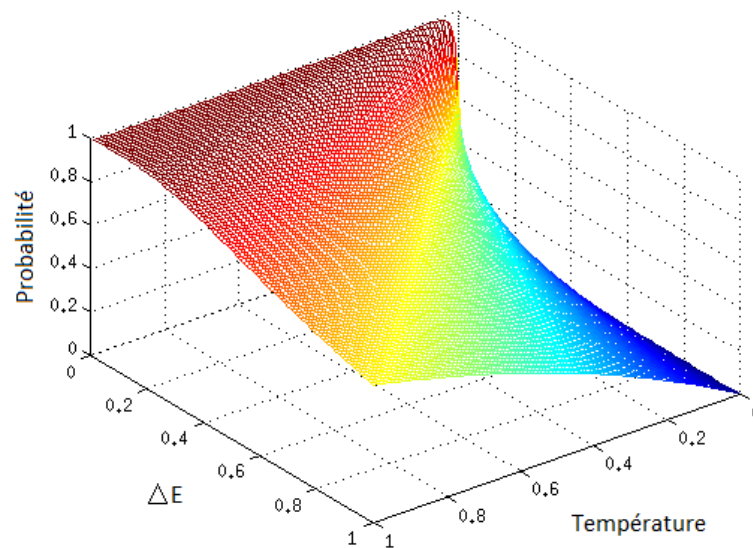


FIGURE 4.11 – Probabilité de retenir un "moins bon" voisin

L'algorithme 2 présente la sélection du meilleur voisin à une température donnée θ .

Algorithme 2 Principe du recuit simulé - Recherche du meilleur voisin à θ

{Algorithme qui simule l'évolution de la fonction-objectif vers son équilibre thermodynamique pour une température donnée θ }

Entrée: - le vecteur optimum S^* trouvé à la température précédente
- la valeur de température actuelle θ

Sortie: Le vecteur S^* dont les valeurs permettent à la fonction-objectif f d'être à l'équilibre thermodynamique à la température θ

{INITIALISATION}

{Calcul de l'énergie initiale $f(S^*)$ }

$E^* \leftarrow f(S^*)$

{PROGRAMME}

Tant que condition d'arrêt non remplie **faire**

$S \leftarrow$ Nouveau voisin de S^*

$E \leftarrow f(S)$

Si $E < E^*$ **Alors**

{Accepter la nouvelle valeur}

$E^* \leftarrow E$

$S^* \leftarrow S$

Sinon

{Accepter la nouvelle valeur avec une probabilité}

Si $\text{Exp}(\frac{-\Delta E}{\theta}) > \text{random}(1)$ **Alors**

$E^* \leftarrow E$

$S^* \leftarrow S$

Fin Si

Fin Si

Fin Tant que

L'étape suivante consiste à faire varier la température θ . Dans notre cas, les paramètres par défaut de Matlab sont maintenus. Son évolution est alors décroissante exponentielle avec une température initiale de 100 (Équation 4.30 et Figure 4.12) :

$$\theta = 100 \times 0.95^k \quad , \text{ avec } k : \text{ nombre d'itérations déjà effectuées} \quad (4.30)$$

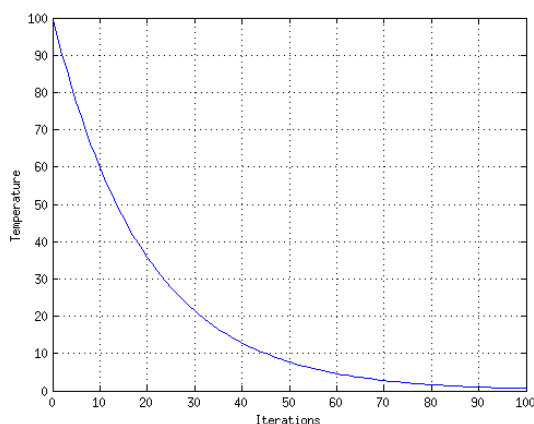


FIGURE 4.12 – Évolution de la température θ en fonction de l'état d'avancement du recuit

Le réchauffement fait partie du processus du recuit simulé. Après un certain nombre de nouveaux points optimum acceptés, la température est à nouveau élevée dans l'espoir de relancer la recherche et de sortir d'un minimum local. Cet intervalle de nombre de points acceptés peut être déterminé par l'utilisateur (paramètre par défaut sous Matlab *Reanneal_Interval* = 100).

Ainsi, on obtient l'algorithme appelant la fonction de recherche du meilleur voisin en faisant évoluer la température θ à chaque itération k (Algorithme 3).

Conditions d'arrêt

Les conditions d'arrêt de l'optimisation du recuit simulé peuvent être choisies en fonction de différents critères, qui sont :

- Le recuit simulé effectue un suivi de la variation moyenne de la valeur de l'énergie sur un nombre fixé d'itérations $\{StallIterLimit \leftarrow 50\}$. Cette variation est inférieure à une tolérance déterminée $\{TolFun \leftarrow 10^{-6}\}$.
- Le nombre d'itération k dépasse une valeur limite $\{MaxIter \leftarrow +\infty\}$ ⁵.
- Le nombre d'évaluation de la fonction-objectif dépasse un certain seuil $\{MaxFunEval \leftarrow 3000 \times \text{nombre de variables d'entrée}\}$. Cette condition stoppe à coup sûr le processus d'optimisation.
- Un temps de calcul limite $\{TimeLimit \leftarrow +\infty\}$ ⁵.
- La valeur retournée par la fonction-objectif inférieure à une énergie limite $\{ObjectiveLimit \leftarrow -\infty\}$ ⁵.

4.2/ INTÉRÊT DE LA MÉTHODE DU RECUIT SIMULÉ

Pour notre problématique, l'écriture de la fonction-objectif a été adaptée en fonction de l'architecture hybride électrique considérée. Le temps moyen d'évaluation de la fonction-objectif est de l'ordre 15 secondes (avec une variation de moins de une seconde pour une solution immédiatement rejetée, à une cinquantaine de secondes). Il est donc impératif de choisir une méthode d'optimisation efficace (pas trop d'appels à l'évaluation de la fonction-objectif) qui trouve une bonne solution en un temps raisonnable.

La méthode du recuit simulé répond à ces attentes :

- elle est disponible dans l'environnement Matlab du Mésocentre de Besançon⁶. Il est donc possible de lancer plusieurs calculs sans monopoliser les ressources de son propre ordinateur.
- elle est facilement paramétrable sous Matlab.
- Le fait d'accepter une dégradation temporaire de la solution courante (acceptation de voisins moins bons) permet de sortir des minimums locaux.

5. Ces critères ne sont pas pris en compte pour notre optimisation

6. L'objectif du mésocentre de Besançon est de donner aux industriels, aux équipes de recherche des moyens de calcul de hautes performances. Lien internet : "meso.univ-fcomte.fr"

Algorithme 3 Loi de décroissance de la température - Appel à la fonction de recherche**Entrée:** - température de départ θ_0 - vecteur aléatoire S_0 dont les valeurs se trouvent dans l'espace de recherche- Intervalle de nombre de points acceptés *Reanneal_Interval***Sortie:** Le vecteur S^* pour lequel la fonction-objectif retourne la valeur minimale

{INITIALISATION}

 $S^* \leftarrow S_0$ $\theta \leftarrow \theta_0$ $k \leftarrow 0$ *Nombre_iterations* $\leftarrow 0$

{PROGRAMME}

Tant que Condition d'arrêt non remplie **faire**

{Recherche du meilleur voisin en fonction de la température actuelle et en fonction du meilleur voisin à la température précédente. Appel à l'algorithme 2}

 $S^* \leftarrow$ Recherche du meilleur voisin (θ, S^*)

{Durant la descente en température, on comptabilise le nombre de points optimums acceptés}

Si Nombre de points optimums acceptés $\geq$ *Reanneal_Interval* **Alors**

{Rehaussement de la température}

 $k \leftarrow 0$ $\theta \leftarrow \theta_0$ **Sinon**

{Température suivante}

 $k \leftarrow k + 1$ $\theta \leftarrow \theta_0 \times 0,95^k$ **Fin Si***Nombre_iterations* $\leftarrow$ *Nombre_iterations* + 1**Fin Tant que**

5/ MÉTHODE D'OPTIMISATION PAR ALGORITHME GÉNÉTIQUE

5.1/ INTÉRÊT DES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES

L'architecture hybride électrique pour laquelle les deux packs de batteries et de supercondensateurs sont reliés directement entre eux (Chapitre 3 - Figure 3.2), utilisent des variables d'optimisation discrètes. Effectivement, les nombres de cellules en série et en parallèle pour chacun des packs (NS_{bat} , NP_{bat} , NS_{sc} et NP_{sc}) sont dépendants les uns des autres. Il n'est plus possible de déduire ces quantités séparément par le calcul.

Or, la fonction du recuit simulé de Matlab ne permet pas d'intégrer des variables d'optimisation discrètes. La méthode le permettant est l'optimisation par algorithmes génétiques.

5.2/ PRINCIPE DES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES

L'algorithme génétique est une méthode d'optimisation dite "à population". Il fait évoluer un ensemble d'individus (une population d'individus qui correspondent à des solutions) avec des caractéristiques (variables d'optimisation). Ainsi, on a n individus choisis aléatoirement dont les caractéristiques sont représentées par une fréquence de coupure f_c , une profondeur de décharge pour les batteries DOD_{bat} , un ratio de tension pour les supercondensateurs d_{sc} , une température ambiante T et des caractéristiques de packs, respectivement pour les batteries, pour les supercondensateurs NS_{bat} , NP_{bat} , NS_{sc} , NP_{sc} .

On fait évoluer cette population sur un nombre de générations fixé par l'utilisateur. Les étapes sont les suivantes :

— **Évaluer chaque individu de la génération.**

Un poids est attribué à chacun des individus en fonction de leur valeur de la fonction-objectif.

— **Effectuer une sélection sur la population.**

On détermine aléatoirement $n/2$ couples. La probabilité de sélectionner l'individu le plus fort du couple est proportionnelle à leur poids.

Les individus les plus forts de toute la génération peuvent être sélectionnés systématiquement (généralement, le premier et le second) en leur attribuant une probabilité de 1.

Le nouveau nombre d'individus est de : $n \leftarrow n/2$

— **créer une nouvelle génération.**

À nouveau, on détermine $n/2$ couples d'individus-parents. Les deux individus-enfants vont obtenir une partie des caractéristiques de chaque individus-parents.

Une faible probabilité de mutation est appliquée sur chaque caractéristiques reçues. Ceci peut permettre à l'optimisation de quitter un minimum local.

Chacune de ces étapes est traduite par les algorithmes "Evaluation" 4, "Selection" 5 et "Nouvelle_generation" 6.

L'évaluation d'une génération est réalisée comme suit (Algorithme 4) :

Algorithme 4 Algorithme d'évaluation des individus d'une population - "Evaluation"

Entrée: Population courante G

Sortie: Évaluation de chaque individu - vecteur p_G

{INITIALISATION}

$k \leftarrow 1$

$nombre_individus \leftarrow$ nombre d'individus de G

{PROGRAMME}

Tant que $k \leq nombre_individus$ **faire**

 {Évaluation pour chaque individu par la fonction-objectif f }

$p_G[k] \leftarrow f(G[k])$

$k \leftarrow k + 1$

Fin Tant que

Après avoir évalué chaque individu de la population, ceux-ci sont répartis aléatoirement par couple. La probabilité pour le plus fort du couple (celui dont le poids ou le rang est le meilleur) d'être sélectionné est plus importante (Algorithme 5).

Algorithme 5 Algorithme de sélection des meilleurs individus d'une population avec un individu "maître" de poids le plus fort - "*Selection*"

Entrée: - Population courante - vecteur G
 - Poids obtenus par individu - vecteur p_G

Sortie: Individus sélectionnés - vecteur $G_{\frac{1}{2}}$

{INITIALISATION}

$k \leftarrow 1$

$Nombre_couples \leftarrow (\text{nombre d'individus de } G)/2$

{PROGRAMME}

{Détermination aléatoire de couples parmi la génération G - vecteur $Couples$ }

$Couples \leftarrow$ fonction "**Détermination aléatoire de couples parmi G** "

Tant que $k \leq nombre_couples$ **faire**

{Si un des membres du couple est "maître" celui-ci est sélectionné}

Si $p_G[individu\ 1\ de\ Couples[k]] = maximum\ de\ p_G$ **Alors**

$Probabilité \leftarrow 1$

Sinon Si $p_G[individu\ 2\ de\ Couples[k]] = maximum\ de\ p_G$ **Alors**

$Probabilité \leftarrow 0$

Sinon

{sinon, on calcule la probabilité de garder l'individu 1 du couple}

$Probabilité \leftarrow \frac{p_G[individu\ 1\ de\ Couples[k]]}{p_G[individu\ 1\ de\ Couples[k]] + p_G[individu\ 2\ de\ Couples[k]]}$

Fin Si

{la sélection se fait de manière stochastique uniforme - fonction $random(1)$ valeur aléatoire entre 0 et 1}

Si $random(1) < Probabilité$ **Alors**

$G_{\frac{1}{2}}[k] = individu\ 1\ de\ Couples[k]$

Sinon

$G_{\frac{1}{2}}[k] = individu\ 2\ de\ Couples[k]$

Fin Si

$k \leftarrow k + 1$

Fin Tant que

Les individus sélectionnés sont répartis en couple-parent. Les deux individus-enfants se répartissent une partie des caractéristiques des individus du couple-parent (Algorithme 6).

Algorithme 6 Algorithme de création d'une nouvelle génération - "*Nouvelle_generation*" par la méthode "*crossover scattered*"

Entrée: Génération parents - vecteur de caractéristiques $G_{\frac{1}{2}}$

Sortie: Nouvelle génération - vecteur de caractéristiques G

{INITIALISATION}

$k \leftarrow 1$

$Nombre_couples \leftarrow (\text{nombre d'individus de } G_{\frac{1}{2}})/2$

$Nombre_caracteristiques \leftarrow \text{nombre de caractéristiques par individu de } G_{\frac{1}{2}}$

{PROGRAMME}

{Détermination aléatoire de couples parmi la génération $G_{\frac{1}{2}}$ - vecteur *Couples*}

Couples $\leftarrow$ fonction "**Détermination aléatoire de couples parmi $G_{\frac{1}{2}}$** "

Tant que $k \leq nombre_couples$ **faire**

{Création d'un vecteur binaire aléatoire *binary_vector* de longueur "nombre de bit nécessaires pour coder toutes les variables identifiant un individu" *longueur_binary_vector*}

{la fonction *round(random[1])* retourne aléatoirement 0 ou 1}

$l \leftarrow 1$

Tant que $l \leq longueur_binary_vector$ **faire**

$binary_vector[l] \leftarrow round(random[1])$

$l \leftarrow l + 1$

Fin Tant que

{Sauvegarde des deux nouveaux individus dans le vecteur *Enfants*}

Enfants[k] $\leftarrow$ fonction "**nouveaux_individus**(*binary_vector*, *Couples*)"

$k \leftarrow k + 1$

Fin Tant que

{Nouvelle génération}

$G \leftarrow G_{\frac{1}{2}} \cup Enfants$

La fonction "**nouveaux_individus**" est décrite ci-dessous sous forme de croquis. Les variables d'entrée sont le vecteur binaire aléatoire *binary_vector* permettant de répartir les gènes parents aux deux enfants et le vecteur *Couples* représentant les deux parents. Les gènes représentent chaque bit des différentes variables d'optimisation de l'individu (Figure 4.13).

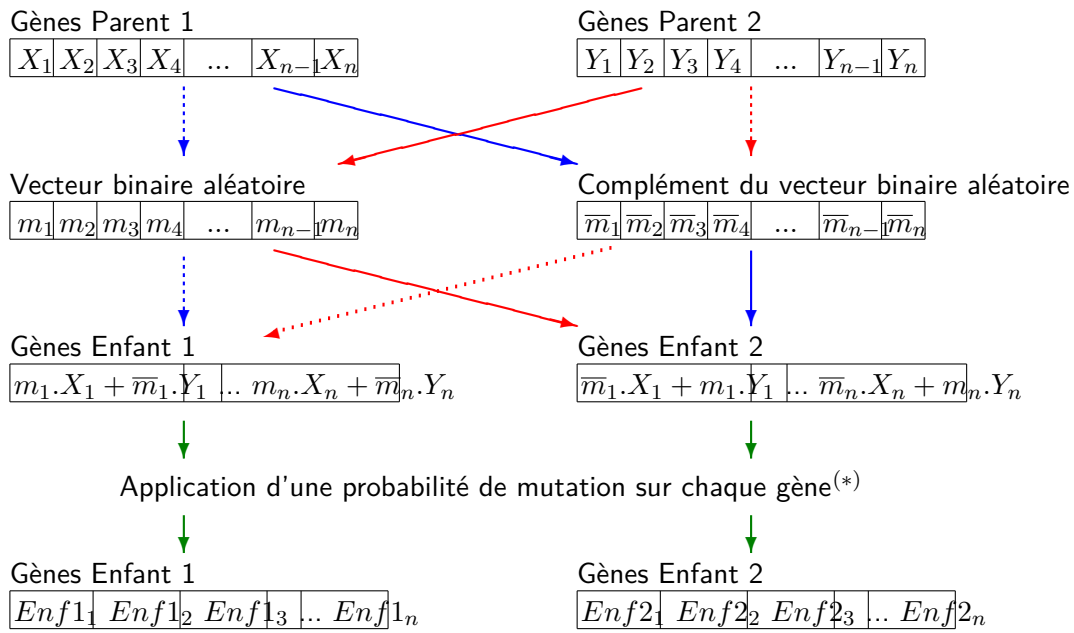


FIGURE 4.13 – Principe de création de nouveaux individus

(*) **Application de la probabilité de mutation :**

Par défaut sous Matlab, la probabilité de mutation est réalisée à l'aide d'une variable X suivant une loi gaussienne. Cette loi évolue en fonction du numéro de la génération en cours ($g \geq 1$) (Figure 4.14). On a :

$$X \sim \mathcal{N}(0, \sigma_g^2) \quad (4.31)$$

$$\text{avec } \sigma_g = \sigma_{g-1} \times \left(1 - \frac{g}{\text{nombre_generations}}\right) \text{ et}$$

$$\sigma_0 = 1$$

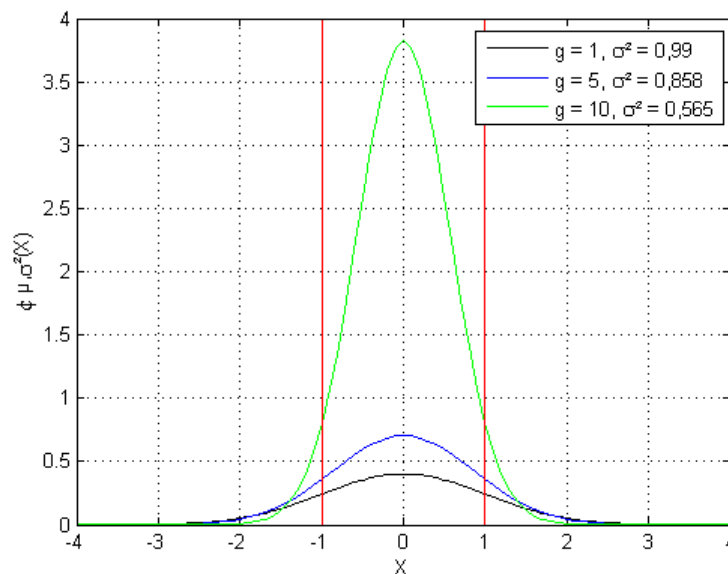


FIGURE 4.14 – Densité de probabilité en fonction de l'itération g entre -1 et 1

Ainsi, à chaque itération g , la proportion d'individus se trouvant entre -1 et 1 augmente pour tendre vers 1.

Progressivement, à partir d'une variable aléatoire x comprise entre 0 et 1, la probabilité de mutation sur un gène diminue : $P(-1 \leq X \leq 1) < x$.

Les fonctions de répartition des lois créées en fonction de g peut s'écrire de la manière suivante :

$$\Phi_g(X) = \int_{-1}^1 \phi_g(X).dX \quad (4.32)$$

Au final, on obtient la probabilité de mutation par gène en fonction de la génération g en cours (Figure 4.15).

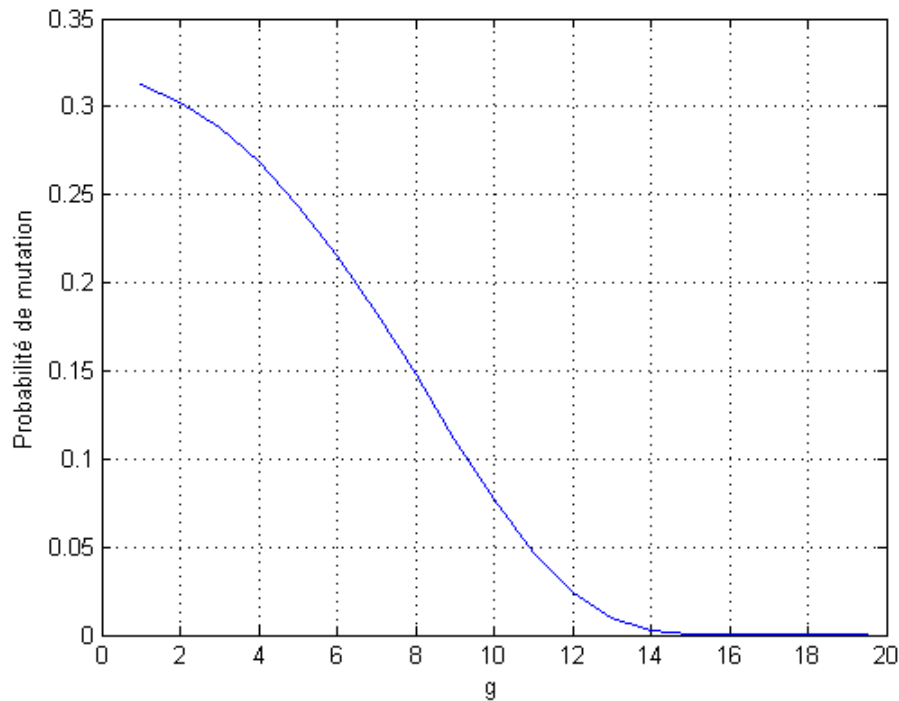


FIGURE 4.15 – Probabilité de mutation en fonction de la génération en cours

Conditions d'arrêt

Les conditions d'arrêt de l'optimisation par algorithme génétique peuvent être choisies en fonction de différents critères, qui sont :

- Le nombre de générations dépasse une valeur limite $\{Generations \leftarrow 100\}$. Cette condition permet de sortir de l'optimisation quoi qu'il arrive.
- Le changement moyen de la valeur optimale trouvée est inférieur à une valeur fixée $\{TolFun \leftarrow 10^{-6}\}$ dans une limite de générations fixée $\{StallGenLimit \leftarrow 50\}$.
- Pas d'amélioration de la fonction-objectif pendant un certain temps $\{StallTimeLimit \leftarrow +\infty\}$ ⁷.

- Un temps de calcul limite $\{TimeLimit \leftarrow +\infty\}$ ⁷.
- La valeur retournée par la fonction-objectif inférieure à une valeur limite $\{FitnessLimit \leftarrow -\infty\}$ ⁷.

A partir des conditions d'arrêt, il est maintenant possible d'établir un algorithme principal 7 faisant appel aux différents algorithmes établis précédemment et permettant de faire évoluer une population initiale.

Algorithme 7 Algorithme principal de l'optimisation par algorithme génétique - Appel aux fonctions représentant les différentes étapes

Entrée: /

Sortie: Le vecteur S^* pour lequel la fonction-objectif retourne la valeur minimale

{INITIALISATION}

{Nombre d'individus}

$n \leftarrow 100$

{Population initiale prise aléatoirement dans le domaine de recherche}

$G \leftarrow$ vecteur de n individus

{PROGRAMME}

Tant que Condition d'arrêt non remplie **faire**

{Évaluation de la population - retourne un vecteur poids p_G de dimension n }

$p_G \leftarrow$ fonction "**Évaluation**(G)"

{Sélection des individus les plus forts - retourne un vecteur population $G_{\frac{1}{2}}$ de dimension

$n/2$ }

$G_{\frac{1}{2}} \leftarrow$ fonction "**Sélection**(p_G)"

{Création de la nouvelle génération - retourne un nouveau vecteur population G }

$G \leftarrow$ fonction "**Nouvelle génération**($G_{\frac{1}{2}}$)"

Fin Tant que

$S^* \leftarrow$ meilleur élément de G

6/ MODIFICATIONS APPORTÉES À LA FONCTION-OBJECTIF EN FONCTION DE L'ARCHITECTURE CHOISIE

La fonction-objectif diffère quelque peu suivant l'architecture hybride électrique étudiée. La base même de celle-ci est maintenue mais certains paramètres doivent être modifiés.

7. Ces critères ne sont pas pris en compte pour notre optimisation

6. MODIFICATIONS APPORTÉES À LA FONCTION-OBJECTIF EN FONCTION DE L'ARCHITECTURE CH

- Ainsi, les tensions en sortie de système hybride doivent pouvoir être reconditionnées pour répondre au cahier des charges, soit $0,88pu \leq U_{bus} \leq 1,02pu$. Nous considérons que les convertisseurs Boost DC/DC ont un coefficient multiplicateur maximum de 2 (Paragraphe 5.2).
- Certaines architectures permettent un contrôle du système par filtre passe-bas. Les domaines possibles de la fréquence de coupure du filtre sont fonction de l'architecture.
- Les plages de valeurs possibles de la profondeur de décharge et du ratio de tension, respectivement, pour les batteries et pour les supercondensateurs sont invariables, mais peuvent ne pas être prise en considération pour certaines architectures.

Sous forme de tableau 4.4, cette partie détaille les spécificités de chacune de ces architectures.

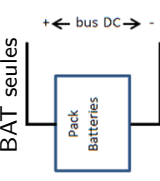
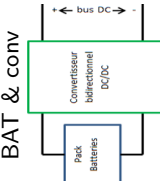
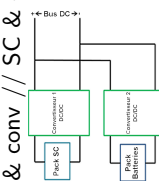
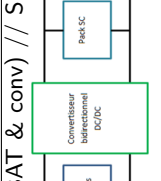
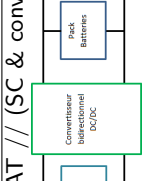
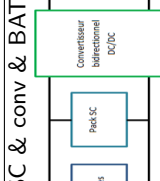
Modèles hybrides	Tensions limites en sortie de pack	Limites sur les variables d'optimisation			Remarques
		Fréquence de coupure (f_c)	- Profondeur de décharge des BAT (DOD) - Ration de tension des SC (d_{sc})	Température (T)	
BAT seules 	Pas de convertisseur : $U_{bus} = U_{pack_{bat}}$ $0,88pu \leq U_{pack_{bat}} \leq 1,02pu$	Pas de contrôle possible sur le système	$0,1 \leq DOD \leq 0,75$	$-25^{\circ}C \leq T \leq 55^{\circ}C$	- La tension de sortie du pack ne doit pas descendre sous 0,88pu. ⇒ faible décharge des batteries. ⇒ nombre important de branches en parallèle. - Tension du bus non stable
BAT & conv 	$0,5pu \leq U_{pack_{bat}} \leq 0,88pu$	Pas de contrôle possible sur le système	$0,1 \leq DOD \leq 0,75$	$-25^{\circ}C \leq T \leq 55^{\circ}C$	Plage de tension plus importante. ⇒ Décharge des batteries plus importante. ⇒ moins de branches en parallèle Gain de masse suffisant pour compenser celle du convertisseur Boost?
BAT & conv // SC & conv 	$0,5pu \leq U_{pack_{bat}} \leq 0,88pu$ $0,5pu \leq U_{pack_{sc}} \leq 0,88pu$	$10^{-4}Hz \leq f_c \leq 0,1Hz$	$0,1 \leq DOD \leq 0,75$ $0,5 \leq d_{sc} \leq 0,9$	$-25^{\circ}C \leq T \leq 55^{\circ}C$	Réponse immédiate des SC à un pic de puissance. Puis les batteries prennent le relais. ⇒ Moins de cellules par pack. Est-ce suffisant pour compenser la masse des deux convertisseurs Boost ?
(BAT & conv) // SC 	$0,5pu \leq U_{pack_{bat}} \leq 0,88pu$ $0,88pu \leq U_{pack_{sc}} \leq 1,02pu$	$1Hz \leq f_c \leq 100Hz$	$0,1 \leq DOD \leq 0,75$ $0,5 \leq d_{sc} \leq 0,9$	$-25^{\circ}C \leq T \leq 55^{\circ}C$	Les SC sont connectés sur le bus. ⇒ Beaucoup de SC en série pour supporter la tension du bus. Le gain de masse en utilisant qu'un seul convertisseur n'est-il annulé par le surpoids de SC ?
BAT // (SC & conv) 	$0,88pu \leq U_{pack_{bat}} \leq 1,02pu$ $0,5pu \leq U_{pack_{sc}} \leq 0,88pu$	$1Hz \leq f_c \leq 100Hz$	$0,1 \leq DOD \leq 0,75$ $0,5 \leq d_{sc} \leq 0,9$	$-25^{\circ}C \leq T \leq 55^{\circ}C$	Les batteries sont connectées sur le bus. La chute de tension aux bornes des batteries ne peut être compensée par les SC. ⇒ tension du bus suffisamment stable sur l'ensemble du profil ?
SC & conv & BAT 	$U_{pack_{bat}} = U_{pack_{sc}}$ $0,5pu \leq U_{pack_{bat}} \leq 0,88pu$ $0,5pu \leq U_{pack_{sc}} \leq 0,88pu$	Pas de contrôle possible sur le système	$0,1 \leq DOD \leq 0,75$ $0,5 \leq d_{sc} \leq 0,9$	$-25^{\circ}C \leq T \leq 55^{\circ}C$	- Nombre de cellules en série d'un pack dépendant de l'autre pack. - Interaction continue entre packs. ⇒ plus grande auto-décharge. - Pas de contrôle. Utilisation des caractéristiques internes des composants.

TABLE 4.4 – Modifications apportées à la fonction-objectif en fonction de l'architecture choisie

7/ CONCLUSION SUR L'OPTIMISATION DE LA MASSE DES SYSTÈMES HYBRIDES

Ce chapitre décrit les différentes étapes à mettre en œuvre pour minimiser la masse de notre système.

En premier lieu, une fonction-objectif retournant une masse du système a été proposé. Cette valeur de masse est fonction de différents paramètres issus de la masse unitaire d'un composant, du nombre de cellules en parallèle et en série dans le pack. Si l'architecture électrique est composée de convertisseurs Boost DC/DC, la masse de ceux-ci a également été prise en compte.

Les nombres de cellules en parallèle, en série sont dépendantes de différents critères. La fréquence de coupure permet de répartir la puissance demandée sur les différents packs et en fonction de la dynamique souhaitée. La profondeur de décharge des batteries fixe un seuil sous lequel le composant ne doit pas descendre, sous peine de le détériorer; idem pour le ratio de tension, en dessous duquel le supercondensateur serait altéré. De plus, la température ambiante est considéré comme une entrée de cette fonction. Ainsi, il est possible de savoir quelles sont les "économies" de puissance à effectuer sur l'ensemble de la plage de température et à quel moment le fonctionnement du système est optimum.

L'ensemble de ces variables d'optimisation doivent satisfaire à des contraintes électriques

Certaines contraintes peuvent être déduites rapidement par le calcul. Il s'agit de l'énergie électrique totale devant être stockée par pack pour répondre aux exigences énergétique du bus DC sur l'ensemble du profil de mission. La tension de départ aux bornes des packs ne peut excéder une limite fixée soit par la tension maximale supportée par le bus DC, soit par la tension d'entrée maximale définie en entrée des convertisseurs Boost DC/DC. De ces deux contraintes "a priori", il a été possible d'en définir une troisième qui est le nombre de branches en parallèle minimum par pack.

D'autres contraintes ont été établies. Celles-ci ne peuvent être vérifiées qu'après avoir lancé une simulation de système présumé. Il s'agit des contraintes "a posteriori". Le courant maximum demandé durant le profil, la tension minimale effective en sortie de pack sont difficilement prévisibles par le calcul. La répartition des différentes branches du convertisseur Boost DC/DC est faite en fonction des différentes puissances délivrées par les packs. Celles-ci doivent être d'un rapport un tiers, deux tiers. Cette contrainte ne peut, également, être vérifiée qu'après une simulation.

Notre problème d'optimisation est ainsi modélisé par une fonction objectif non linéaire, non convexe, à minimiser et un ensemble de contraintes à satisfaire.

La méthode du recuit simulé ou l'algorithme génétique (en cas de variables d'entrée discrètes) sont utilisés pour sa résolution. Ces méthodes permettent de trouver de bonnes configurations pour notre système électrique en un temps raisonnable.

Pour compléter cette étude, il est indispensable de valider chacune des caractéristiques de packs trouvées pour les six systèmes électriques hybrides choisis. Ces architectures sont évaluées par représentation énergétique macroscopique (REM) dans le chapitre suivant. Rappelons que le profil de mission utilisé est le plus contraignant énergétiquement et en puissance maximale à délivrer.

ANALYSE ET VÉRIFICATION DU DIMENSIONNEMENT PAR ARCHITECTURE ÉLECTRIQUE

Ce chapitre présente les structures d'éléments de stockage (nombre de cellules en parallèle, nombre de cellules en série) renvoyés par l'algorithme d'optimisation, ainsi que la masse des différents éléments du système (pack de batteries, pack de supercondensateurs et convertisseurs).

Pour valider ces résultats, une représentation énergétique macroscopique (REM) des systèmes est réalisée. Les modèles de composants, jusque là quasi-statiques, sont remplacés par des modèles davantage représentatifs du comportement électrique. Sont utilisés le modèle de Foster d'ordre 1 pour les batteries (Figure 5.39) et le modèle de Zubieta-Bonert à deux branches (Figure 5.51) pour les supercondensateurs.

Quand cela est pertinent, il s'agit également de déterminer l'action à effectuer sur le seul paramètre de contrôle du système, c'est à dire la fréquence de coupure, lorsque la solution proposée à la température d'optimisation ne permet pas d'assurer la mission aux basses températures.

1/ FONCTIONNEMENT ET CARACTÉRISTIQUES DES SYSTÈMES

Les différentes courbes sont fonction des caractéristiques obtenues par optimisation pour chacune des architectures étudiées (Chapitre 4 Paragraphe 2.2). Les différentes limites figurant sur ces figures proviennent du cahier des charges ou des contraintes "a priori".

Dans un premier temps, à partir de ces caractéristiques de pack, la validité des résultats obtenus est vérifiée sous Simulink avec les modèles quasi-statiques [103]. Ainsi, il est possible de déterminer le critère à respecter le plus contraignant par architecture.

Dans les paragraphes 1.2 à 1.7, les résultats de l'algorithme d'optimisation décrit au chapitre 4 sont présentés. La structure des éléments de stockage (nombre de cellules en série et en parallèle), la masse obtenue pour le stockage et les convertisseurs associés sont donnés. Le respect des contraintes est vérifié sur la tension de sortie des packs à la température d'optimisation, sur la plage de température souhaitée, sur le courant maximum...

1.1/ STRATÉGIE MISE EN PLACE AUX BASSES TEMPÉRATURES

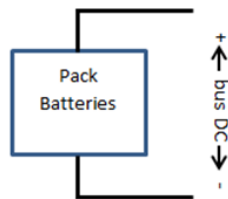
Lorsque la température diminue, la tension en sortie des packs a également tendance à baisser. Lorsque celle-ci devient inférieure à 0,5pu en fin de profil, il est alors possible de régler la fréquence de coupure pour solliciter davantage les supercondensateurs ($f_c \searrow$); et cela tout en maintenant la tension de sortie des batteries à 0,5pu.

Dans ce cas, le courant demandé aux supercondensateurs devient plus important et peut dépasser la valeur maximale de courant toléré par le pack. Il s'agit alors de s'assurer que ce dépassement n'excède pas une seconde. Effectivement, la caractéristique I_{pulse} des supercondensateurs indique une valeur de courant maximale à ne pas dépasser durant cette seconde.

À température encore plus basse, lorsque la tension de sortie des supercondensateurs en fin de profil devient également inférieure à 0,5pu, le système entre en mode de fonctionnement dégradé. La fréquence de coupure est réglée pour avoir une valeur de tension en sortie de chaque pack équivalente. Ces tensions devenant inférieure à 0,5pu, il est alors nécessaire d'alléger la charge électrique en déconnectant un ou plusieurs appareils non indispensables.

1.2/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES SEUL (BAT)

Architecture "Batteries seules"



Caractéristiques du système obtenu par optimisation

Type de batteries : Kokam 2Ah

Batteries en parallèle : 8

Batteries en série : 63

Nombre de batteries : 504

Masse pack ACC : 25,2kg

MASSE TOTALE : 25,2kg

Température minimale : 26,7°C

Tensions de sortie du pack

Figure 5.1 : La tension en sortie de pack est toujours entre les bornes 0,88pu et 1,02pu fixées par le cahier des charges. Le respect de cette contrainte nécessite une faible décharge des batteries, donc un nombre important de batteries. Sans convertisseur, la valeur de la tension du bus décroît en fonction de la décharge des batteries. La régulation autour de 1pu n'est pas réalisée.

Le fait de ne pas devoir descendre sous une tension de 0,88pu en fin de profil représente le critère le plus contraignant de cette architecture.

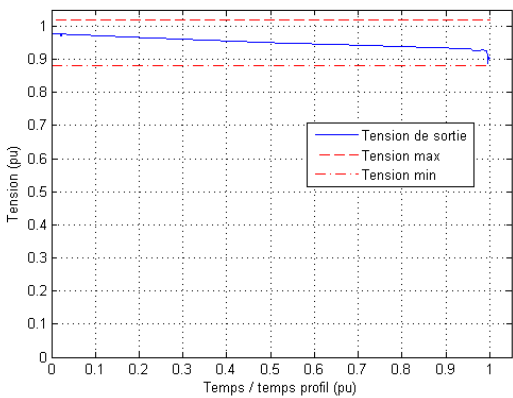


FIGURE 5.1 – Tension de sortie du pack à T=26,7°C

Figure 5.2 : En-dessous d'une température de 26,7°C trouvée par optimisation, la limite inférieure de tension en sortie de pack en fin de profil n'est plus respectée ($V_{bat} < 0,88pu$).

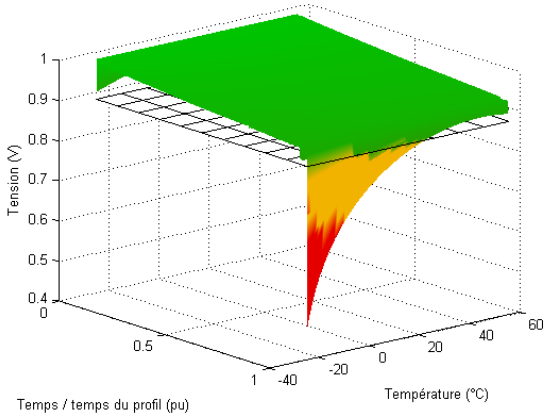


FIGURE 5.2 – Tension de sortie du pack en fonction de la température

De -25°C à -10°C , le système étudié n'est pas capable de fournir la puissance maximale pouvant être demandée par la charge. Un délestage de la charge de 230W par degré Celsius en moins à partir de -10°C , est alors nécessaire pour que l'ensemble puisse toujours répondre au profil de courant (Figure 5.3). La tension ne devant pas descendre sous 0,88pu, en fin de mission, seuls

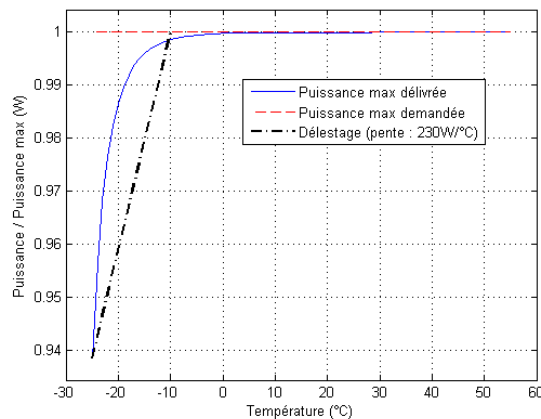


FIGURE 5.3 – Puissance max pouvant être délivrée en fonction de la température

22% de l'énergie stockée est consommée (Figure 5.4). En cas de vieillissement des batteries, les pertes, dues à l'augmentation de la valeur de la résistance interne et une capacité de stockage moindre [98], sont plus importantes. La contrainte sur la tension du bus DC peut ne plus être respectée.

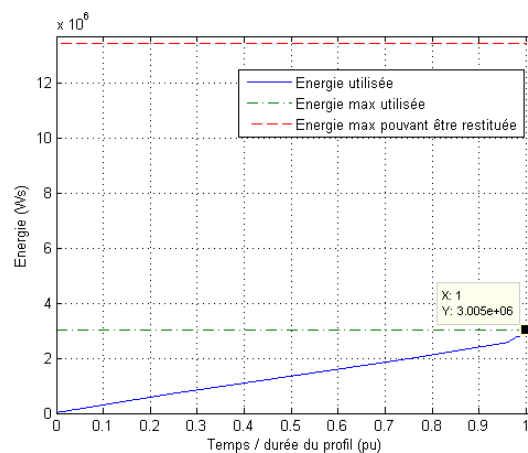


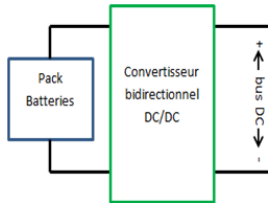
FIGURE 5.4 – Énergie nécessaire pour alimenter la charge

Conclusion : Le fait que les batteries se déchargent durant le profil, la tension du bus DC n'est pas maintenue aux alentours de 1pu.

En-dessus de $26,7^{\circ}\text{C}$, alors que le pack peut toujours fournir la puissance demandée, la tension de sortie ne respecte plus les contraintes d'excursion limitée, sur toute la plage de température. La tension minimale demandée par le cahier des charges de 0,88pu ne peut plus être maintenue.

1.3/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES AVEC UN CONVERTISSEUR

Architecture "Batteries + convertisseur"



Caractéristiques du système obtenu par optimisation

Type de batteries : Kokam 4,8Ah

Batteries en parallèle : 4

Batteries en série : 51

Nombre de batteries : 204

Masse pack ACC : 23,5kg

Masse Convertisseur : 23,6kg

MASSE TOTALE : 47,1kg

Température minimale : 41°C

Tension de sortie du pack

Figure 5.5 : La tension en sortie de pack se situe toujours entre les bornes 0.5pu et 0.88pu fixées par la contrainte "a priori" sur la tension initiale (Chapitre 4 - Paragraphe 1.4.1.2). La validation de ce système en remplaçant le modèle quasi-statique du pack de batteries par le modèle dynamique est nécessaire. Pour cela, une Représentation Énergétique Macroscopique (REM) avec régulation en tension par rapport à la valeur du bus DC souhaitée et en courant par rapport au courant maximum pouvant être délivré par les batteries est possible.

La tension minimale se situe légèrement sous les 0,6 pu. Cette contrainte n'est pas la plus pénalisante pour le système trouvé.

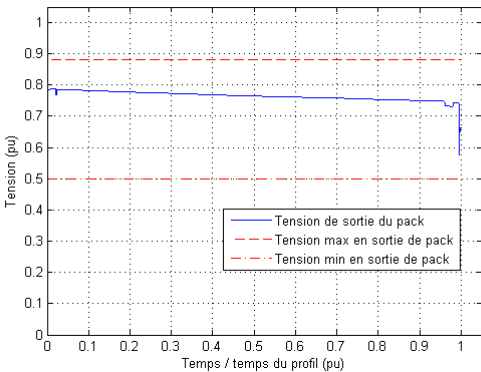


FIGURE 5.5 – Tension de sortie du pack à T=41°C

Figure 5.6 : En-dessous d'une température de 30°C, la limite de tension en sortie de pack en fin de profil n'est plus respectée ($V_{bat} > 0,5pu$).

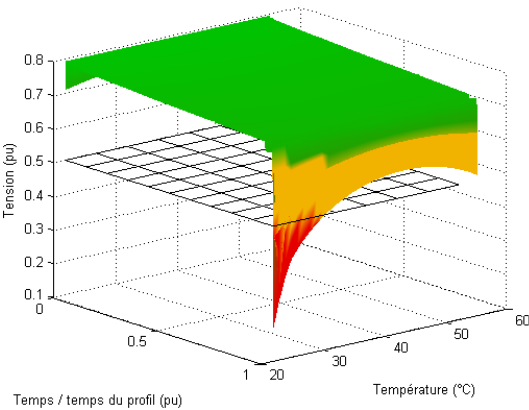


FIGURE 5.6 – Tension de sortie du pack en fonction de la température

Le respect de la demande de courant est la contrainte la plus limitante de cette architecture (Figure 5.7).

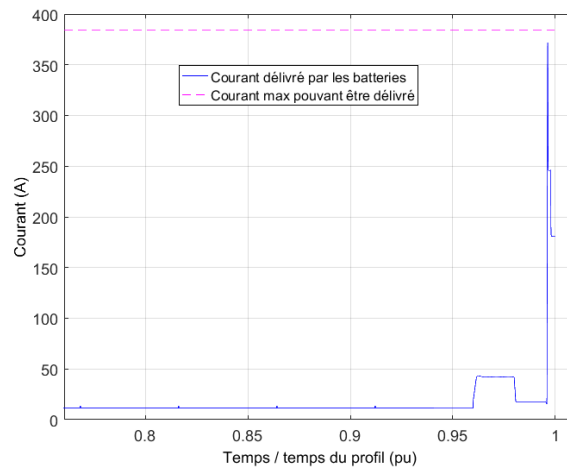


FIGURE 5.7 – Courant demandé en fin de profil à $T=41^{\circ}\text{C}$

Pour maintenir une tension sur le bus DC dans les limites imposées, le courant demandé au pack de batteries va augmenter au fil du profil (équilibre des puissances en entrée et en sortie du convertisseur). Dans ce cas, la chute de tension aux bornes de la résistance interne équivalente R_{equ} du pack va également augmenter. De plus, cette chute de tension est d'autant accélérée que l'état de charge se dégrade rapidement $R_{equ} = f(T, SOC)$ ($I_{bat} \nearrow \Rightarrow SOC \searrow \Rightarrow R_{equ} \nearrow$). Plus la température est basse, plus ce phénomène devient important ($T \searrow \Rightarrow R_{equ} \nearrow$) (Figure 5.8).

Sous 41°C , la puissance maximale pouvant être délivrée avec un courant ne dépassant pas le maximum toléré par les batteries, peut ne plus être suffisante. Le délestage nécessaire est de $1,18\text{kW}$ par degré Celsius en moins, à partir de 35°C . À plus basse température encore, la chute de puissance fournie risque de ne plus pouvoir être compensée par un délestage d'appareillage de la charge (Figure 5.9).

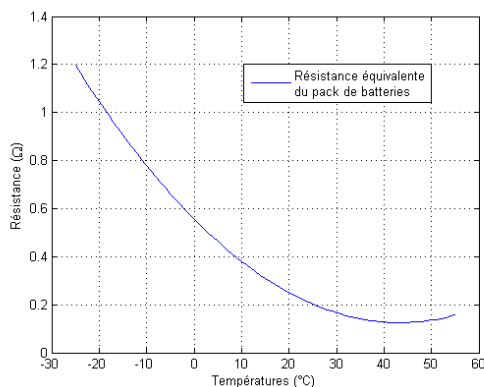


FIGURE 5.8 – Évolution de la résistance équivalente en fonction de la température

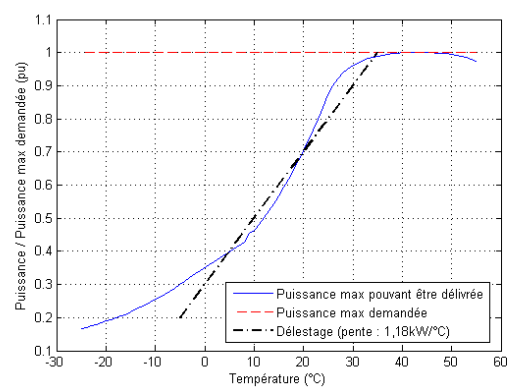


FIGURE 5.9 – Puissance max pouvant être délivrée en fonction de la température

En fin de mission, la demande ponctuelle en courant au pack de batteries est importante. Celui-ci doit pouvoir y répondre, d'où un grand nombre de branches en parallèle dans le pack. Également, il faut maintenir une tension de sortie d'au moins 0,5pu. Un certain nombre de cellules en série reste nécessaire.

Ces deux contraintes demandent un nombre important de cellules dans le pack. Seuls 25% de l'énergie stockée est consommée (Figure 5.10).

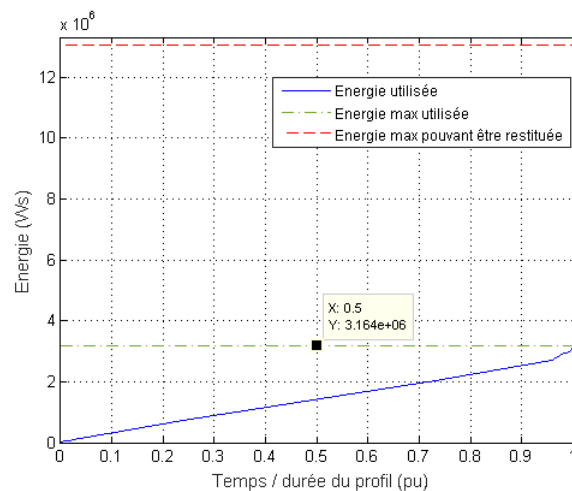


FIGURE 5.10 – Énergie nécessaire pour alimenter la charge

Conclusion : Le système étudié répond aux exigences de la gestion d'énergie à partir de 41°C. Lorsque cette valeur de température décroît et malgré d'éventuelles délestages de puissances, il y a un risque important de ne plus répondre à la demande de la charge.

Ceci est encore accentué par une demande croissante de courant au pack par rapport au courant demandé par le bus DC (équilibre des puissances au niveau du convertisseur DC/DC) pour maintenir sa tension constante. A moins d'un préchauffage du système à la bonne température, cette architecture ne peut répondre pleinement aux exigences du cahier des charges.

1.4/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES AVEC UN CONVERTISSEUR ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS AVEC UN CONVERTISSEUR

Architecture "Batteries + convertisseur et SC + convertisseur"	Tensions de sortie du pack Figure 5.11 : Les tensions en sortie de pack sont toujours supérieures à 0,5pu. La valeur minimale de tension en sortie de pack de batteries est de 0,53pu et en sortie de pack de supercondensateurs de 0,58pu. La contrainte "a posteriori" sur la tension de sortie est respectée ($U_{pack_{min}} > 0,5pu$). La contrainte sur la tension de sortie est toujours respectée pour des températures inférieures aux 7,6°C préconisées par l'optimisation. FIGURE 5.11 – Tension de sortie du pack à T=7,6°C
Caractéristiques du système obtenu par optimisation Type de batteries : Kokam 2Ah Batteries en parallèle : 3 Batteries en série : 45 Nombre de batteries : 135 Type de SC : Batscap 650F SC en parallèle : 3 SC en série : 69 Nombre de SC : 207 Masse pack BAT : 6,8kg Masse Convertisseur : 5,1kg Masse pack SC : 41,4kg Masse Convertisseur : 21,6kg MASSE TOTALE : 75kg Fréquence de coupure : 9,5mHz Température minimale : 7,6°C	Figure 5.12 : En-dessous de -2°C, la contrainte sur la tension de sortie pour les batteries n'est plus respectée. FIGURE 5.12 – Tension de sortie du pack de batteries vs température

La contrainte la plus pénalisante est le courant maximum demandé aux packs (Figure 5.13). En fin de profil, les convertisseurs Boost maintiennent une tension stable et font que les courants nécessaires demandés augmentent.

Le courant maximum supporté par une batterie Kokam 2Ah est de 30A. Le courant maximum toléré par le pack de batteries est de 90A ($3branches \times 30A$ - valeur atteinte en fin de profil). Le courant maximum supporté par un supercondensateur Batscap 650F est de 105A. Le courant maximum toléré par le pack de supercondensateurs est donc de 315A ($3branches \times 105A$ - valeur également atteinte en fin de profil).

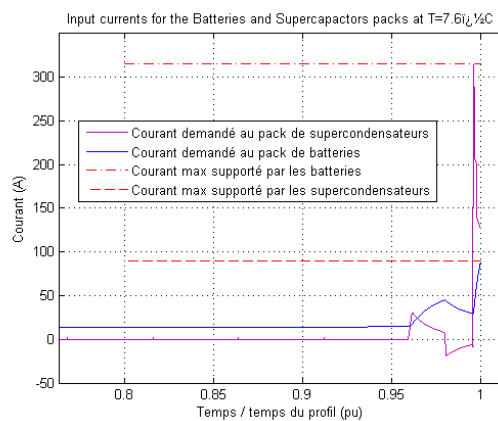


FIGURE 5.13 – Courants demandés en fin de profil à $T=7,6^{\circ}\text{C}$

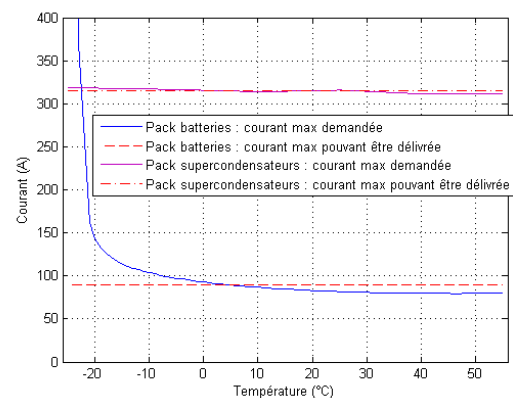


FIGURE 5.14 – Courants max pouvant être délivrés comparé au courant max demandé en fonction de la température

Problèmes rencontrés :

- Le cahier des charges impose un fonctionnement du système entre -25°C et 55°C .
- La tension minimale en sortie de packs ne doit pas descendre sous les 0,5pu. Pour les batteries, cette contrainte n'est plus respectée en-dessous de -2°C (Figure 5.12).
- Sous une température de $7,6^{\circ}\text{C}$, le courant demandé aux packs devient trop important (Figure 5.14).

Recherche de solution :

- L'influence de la température sur le fonctionnement des supercondensateurs est très faible. Ceux-ci n'atteignent pas la tension limite minimale de 0,5pu (Figure 5.11) et donc peuvent être davantage mis à contribution.
- Le réglage de la fréquence de coupure du système permet de solliciter davantage tel ou tel pack de composants.

Par simulation sous Matlab/Simulink, en-dessous d'une température de $7,6^{\circ}\text{C}$, la fréquence de coupure est ajustée de telle manière à ce que le pack de batteries soit moins sollicité ($f_c \searrow$). Le réglage trouvé est indiqué en Figure 5.15. Il permet de ne pas descendre sous une tension de 0,5pu et de ne pas demander un courant supérieur au courant maximum supporté par le pack.

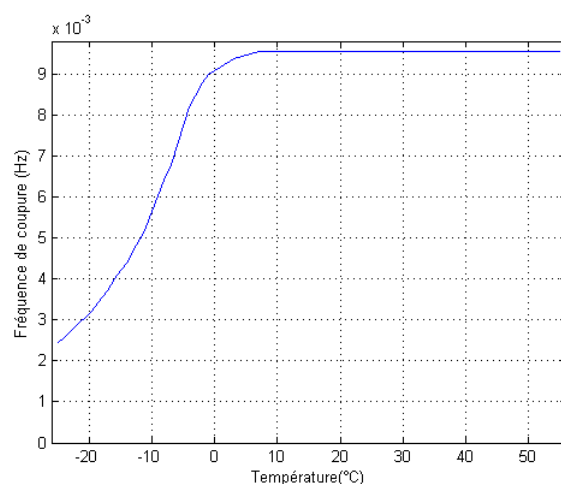


FIGURE 5.15 – Réglage de la fréquence de coupure du filtre passe-bas en fonction de la température pour maintenir la tension minimale $\geq 0,5pu$ en sortie de batteries

En fin de profil, le pack de supercondensateurs peut contribuer à combler la baisse de performances des batteries aux basses températures en réglant la fréquence de coupure du système.

Aux températures critiques, le pack de batteries est alors moins sollicité. Sa tension minimale peut être maintenue à $0,5pu$ (Figure 5.16).

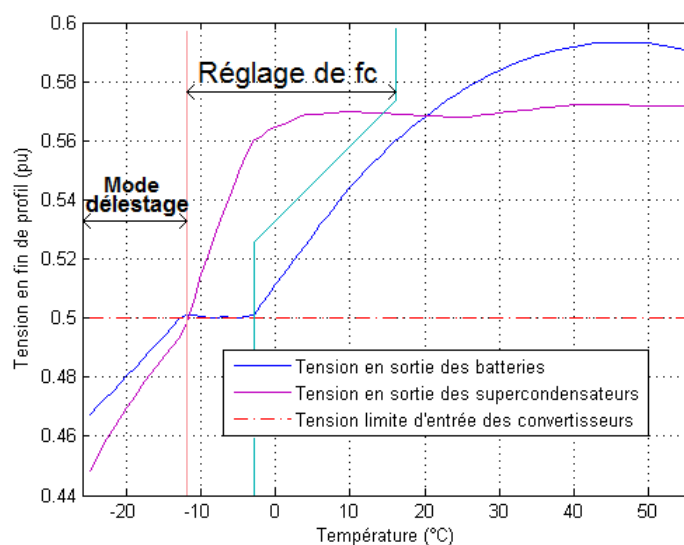


FIGURE 5.16 – Tension fournie en fin de profil par les packs - Réglage de la fréquence de coupure en fonction de la température. Travail réalisé en partie par Yi Fang, stagiaire au sein du laboratoire Femto-st du 1 avril au 30 septembre 2015, en dernière année de Master énergie électrique à l'UFRSTGI Louis Néel de Belfort [91].

Mais la régulation de la tension de sortie du système, ainsi que la baisse de la valeur de fréquence de coupure, va faire que le courant demandé au pack de supercondensateurs devient trop important.

Pour cela, il est nécessaire de s'assurer que ce pic, excessif en amplitude, ne soit pas d'une durée supérieure à une seconde (Figure 5.17). Effectivement, la caractéristique " I_{pulse} " des supercondensateurs nous indique le seuil de courant à ne pas dépasser pendant cette seconde. La valeur de cette caractéristique du supercondensateur Batscap 650F est de 875A.

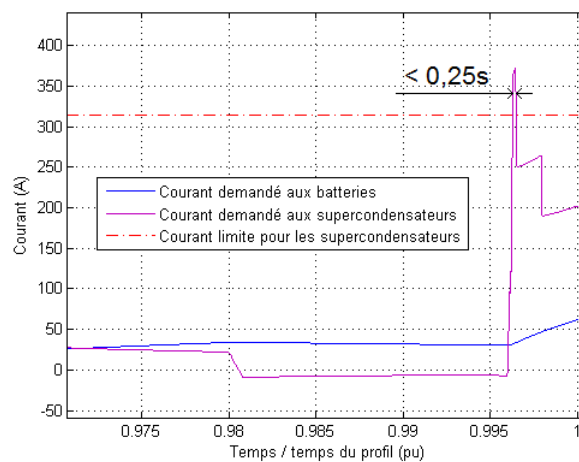


FIGURE 5.17 – Courant demandé en fin de profil aux batteries et aux supercondensateurs

En dessous de -12°C , il n'est plus possible de maintenir une tension de sortie supérieure ou égale à $0,5\text{pu}$. La fréquence de coupure est alors ajustée pour équilibrer les valeurs de tension de sortie des packs. Un délestage de quelques appareils non absolument indispensables provenant de la charge est nécessaire pour que l'ensemble puisse toujours répondre au profil de courant de démarrage demandé. Ce délestage est de 200W par degré Celsius en moins, à partir de -12°C .

Ce système hybride permet de ne pas surdimensionner les packs par rapport à l'énergie à stocker pour les batteries (Figure 5.18) et par rapport au ratio de tension des supercondensateurs (Figure 5.19).

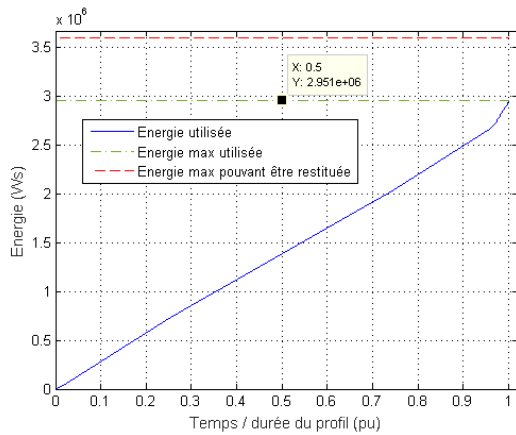


FIGURE 5.18 – Énergie demandée au pack de batteries

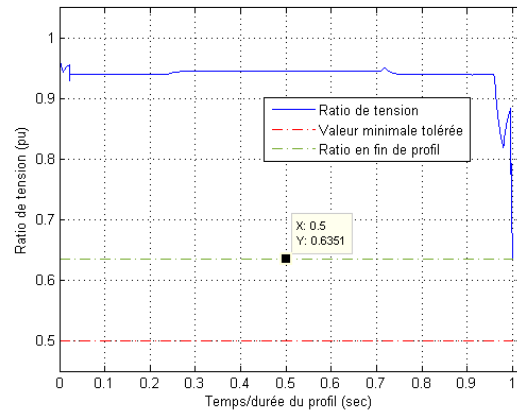
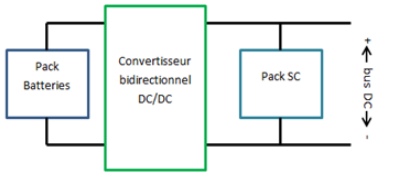
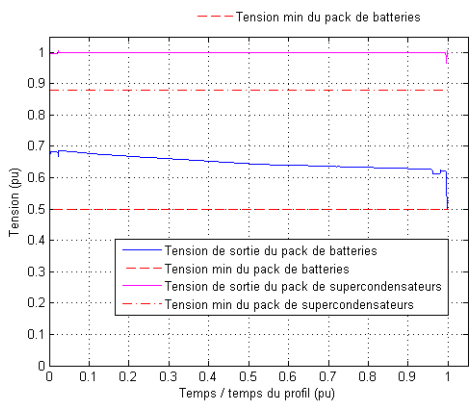
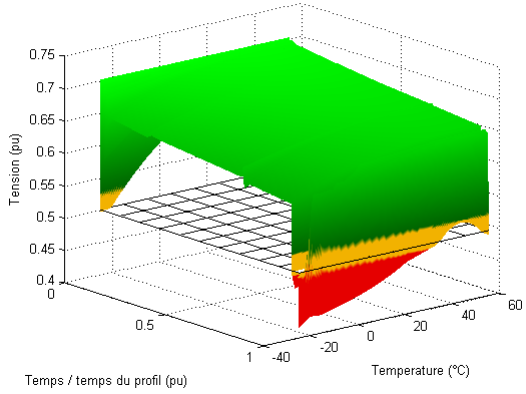


FIGURE 5.19 – Ratio de tension des supercondensateurs durant le profil

Conclusion : Le système étudié répond aux exigences de la gestion d'énergie à la température trouvée par l'optimisation ($T=7,6^{\circ}\text{C}$). Lorsque cette dernière valeur décroît, il est alors possible de régler la fréquence de coupure du système hybride et de solliciter davantage le pack de supercondensateurs. La caractéristique " I_{pulse} " des supercondensateurs permet de connaître le courant maximum acceptable. Il est nécessaire de s'assurer que le temps de l'impulsion n'excède pas une seconde.

De cette manière, une large gamme de température imposée par le cahier des charges est couverte. Dans le cas plus rare où la température ambiante est inférieure à -12°C , pour éviter des oscillations trop importantes en tension sur le bus DC, un délestage de la charge est nécessaire.

1.5/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES AVEC UN CONVERTISSEUR ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS SUR LE BUS DC

Architecture "Batteries + convertisseur et SC 	Tensions de sortie du pack Figure 5.20 : Les supercondensateurs sont connectés directement sur le bus DC. Aux fréquences supérieures à f_c, seul le pack de supercondensateurs fournit la puissance nécessaire aux charges. Durant cette séquence, celui-ci se décharge, la tension à ses bornes diminue ; de fait, la tension du bus DC également. Une fréquence de coupure plus élevée que précédemment permet aux batteries de reprendre le relais plus rapidement. Cela implique une utilisation moindre des supercondensateurs (Figure 5.22), alors qu'un nombre important en série est nécessaire pour supporter la tension du bus d'au moins 1pu. Le respect de la tension minimale de 0,5pu en entrée de convertisseur représente la contrainte la plus pénalisante.
Caractéristiques du système obtenu par optimisation Type de batteries : Kokam 4,8Ah Batteries en parallèle : 4 Batteries en série : 45 Nombre de batteries : 180 Type de SC : Batscap 650F SC en parallèle : 2 SC en série : 97 Nombre de SC : 194 Masse pack BAT : 20,7kg Masse Convertisseur : 19,9kg Masse pack SC : 38,8kg MASSE TOTALE : 79kg Fréquence de coupure : 1,007Hz Température minimale : 38,6°C Température maximale : 52°C	 FIGURE 5.20 – Tension de sortie du pack à T=38,6°C Figure 5.21 : Pour $38,6^{\circ}\text{C} \leq T \leq 52^{\circ}\text{C}$, la contrainte sur la tension de sortie pour les batteries est respectée.  FIGURE 5.21 – Tension de sortie du pack de batteries vs température

De par le fait, de connecter le pack de supercondensateurs directement sur le bus DC, celui-ci nécessite un nombre minimum de cellules en série.

La tension maximale aux bornes d'un supercondensateur est de 2,8V. La tension du bus DC est de 1pu. Le nombre minimum de supercondensateurs en série est de : $N_{S_{cmin}} = \left\lceil \frac{1pu}{2,8V} \right\rceil$.

La conséquence de cette contrainte est un ratio de tension du pack évoluant peu (Figure 5.22). Par rapport à leur nombre, les supercondensateurs sont sous-utilisés en puissance à délivrer.

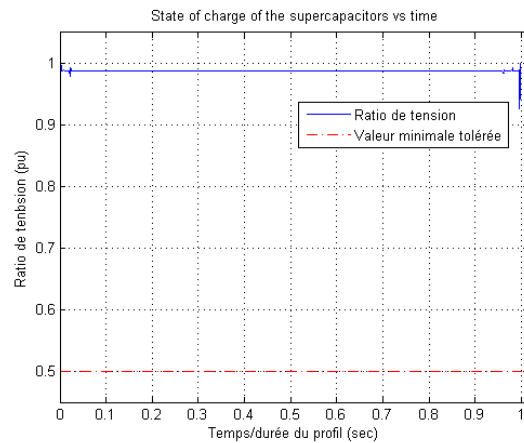


FIGURE 5.22 – Ratio de tension des supercondensateurs sur l'ensemble du profil de mission

Les supercondensateurs sont peu sollicités, les batteries doivent supporter davantage la demande en courant de la charge. Le nombre de branches en parallèle est alors conséquent. Mais également, le nombre de batteries en série doit pouvoir délivrer une tension de 0,88pu (tension maximale en entrée de convertisseur DC/DC). Le pack de batteries est alors sous-utilisé en énergie (Figure 5.23).

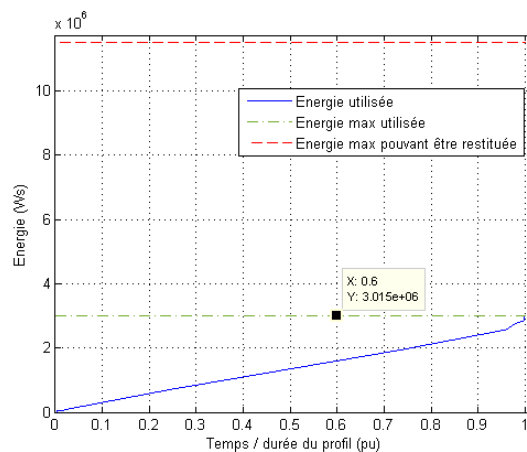


FIGURE 5.23 – Énergie demandée au pack de batteries

La résistance interne de la batterie évolue en fonction de la température. Ainsi, la valeur de cette résistance augmente aux températures les plus faibles, mais également aux températures extrêmes chaudes pour un SOC donné (Figure 5.24).

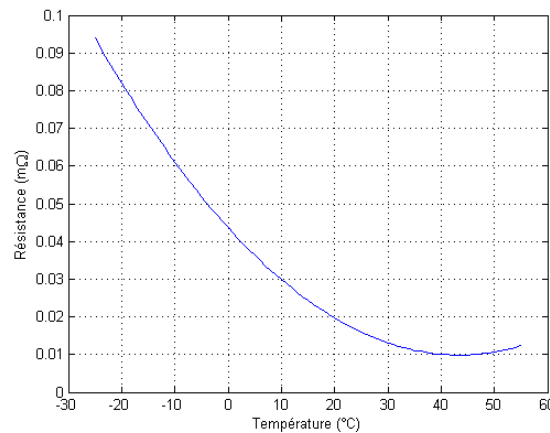


FIGURE 5.24 – Évolution de la résistance interne des batteries en fonction de la température - La valeur de résistance est identique à 38,6°C et à 52°C (bornes de température où le système est fonctionnel)

De même que pour l'architecture électrique précédente, à des températures inférieures à 38,6°C et supérieures à 52°C, une compensation de la demande de puissance en réglant la fréquence de coupure du filtre passe-bas est réalisée (Figure 5.25).

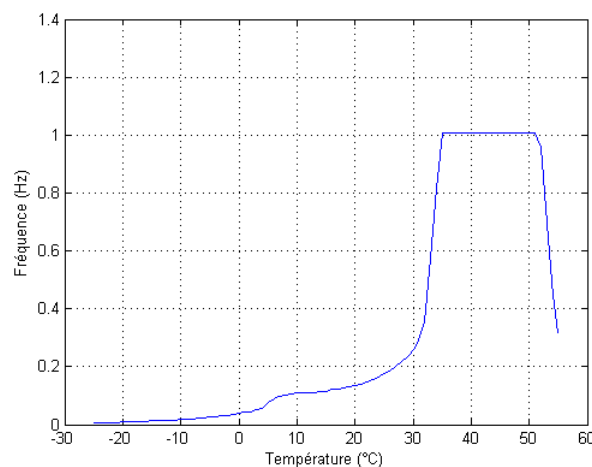


FIGURE 5.25 – Réglage de la fréquence de coupure du filtre passe-bas en fonction de la température pour maintenir la tension minimale $\geq 0,5pu$ en sortie de batteries

Ainsi, la tension en sortie de pack de batteries n'est pas inférieure à 0,5pu (tension minimale acceptable en entrée de convertisseur) et, en sortie de pack de supercondensateurs, pas inférieure à 0,88pu (Tension minimale tolérée sur le bus DC) (Figure 5.26).

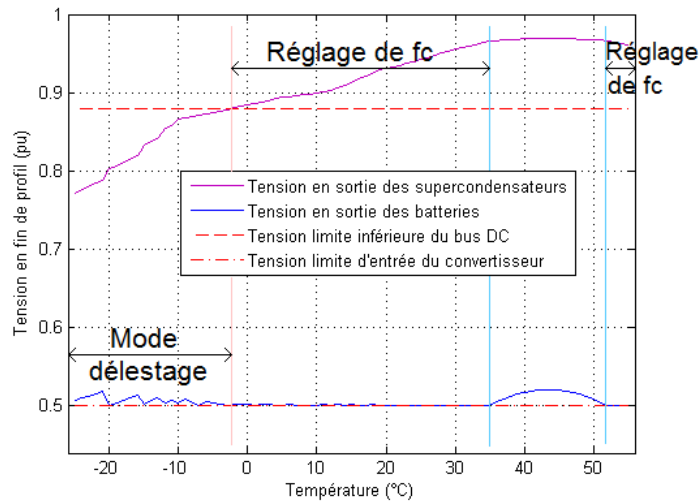


FIGURE 5.26 – Réglage de la fréquence de coupure du filtre passe-bas en fonction de la température pour maintenir la tension minimale $\geq 0,5pu$ en sortie de batteries

Sous une température de -3°C , les supercondensateurs ne peuvent plus maintenir la tension de $0,88pu$ en fin de profil. Un mode "délestage" de la charge est mis en place (Figure 5.27). Ce mode nécessite de déconnecter les appareils non absolument nécessaire au démarrage de l'appareil. Ce délestage est de $255W$ par degré Celsius inférieure à -3°C .

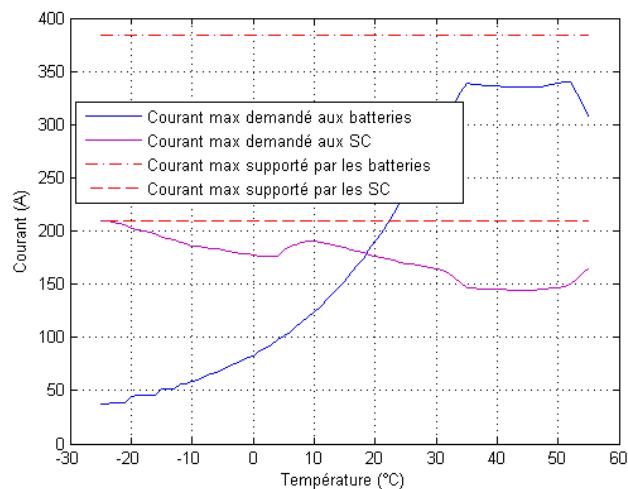


FIGURE 5.27 – Réglage de la fréquence de coupure du filtre passe-bas en fonction de la température pour maintenir la tension minimale $\geq 0,5pu$ en sortie de batteries

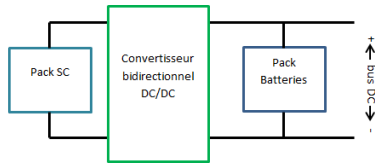
Le fait de modifier la fréquence de coupure impose un courant maximum au pack de supercondensateurs plus important. À la température minimale imposée par le cahier des charges, ce courant maximum demandé dépasse légèrement le courant maximum toléré par

les supercondensateurs (Figure 5.27). La caractéristique i_{pulse} permet d'accepter cet état.

Conclusion : Les supercondensateurs étant directement placés sur le bus DC, ceux-ci répondent aux demandes de pic de puissance. Mais, lors de cette demande, ils se déchargent : tant que le pack de batteries n'a pas repris le relais, la tension du bus DC ne dépend que des seuls supercondensateurs. C'est pourquoi, les batteries en entrée de convertisseur doivent prendre le relais rapidement pour maintenir cette tension et recharger les supercondensateurs. De plus, pour supporter la tension du bus, un nombre important de ces derniers sont placés en série. L'ajout de supercondensateurs est le plus pénalisant sur la masse du système. Le fait de modifier la fréquence de coupure du filtre passe-bas permet d'élargir la plage de température de fonctionnement. En-dessous de -3°C , un délestage de la charge est nécessaire.

1.6/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES SUR LE BUS DC ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS AVEC UN CONVERTISSEUR

Architecture "Batteries + SC + convertisseur"



Caractéristiques du système obtenu par optimisation

Type de batteries : Kokam 2Ah

Batteries en parallèle : 8

Batteries en série : 65

Nombre de batteries : 520

Type de SC : Batscap 650F

SC en parallèle : 1

SC en série : 51

Nombre de SC : 51

Masse pack BAT : 26kg

Masse pack SC : 10kg

Masse Convertisseur : 8kg

MASSE TOTALE : 44kg

Fréquence de coupure : 9.94Hz

Température minimale : 30,8°C

Tensions de sortie du pack

Figure 5.28 : Les batteries sont directement connectées sur le bus DC. Les supercondensateurs assurant uniquement les demandes en puissance, la tension du bus est tributaire de la tension de sortie du pack de batteries donc de leur état de charge. Pour maintenir celle-ci dans les limites fixées par le cahier des charges ($0,88pu \leq U_{bus} \leq 1,02pu$), les batteries ne doivent pas se décharger excessivement. Le pack de batteries est donc composé d'un nombre conséquent de cellules.

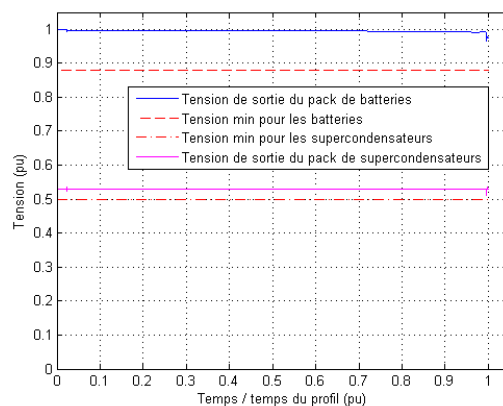


FIGURE 5.28 – Tension de sortie des packs à $T=30,8^{\circ}\text{C}$

Figure 5.29 : Quelque soit la température externe, la contrainte sur la tension de sortie pour les batteries est respectée. Les supercondensateurs comblent les pertes de puissances dues aux faibles températures.

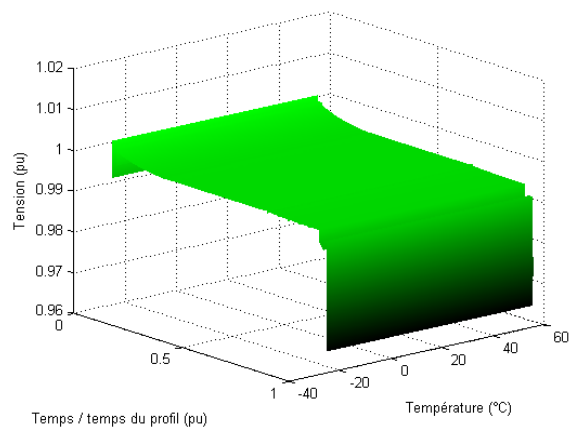


FIGURE 5.29 – Tension de sortie des packs vs température

La contrainte la plus pénalisante est le courant maximum demandé aux packs de supercondensateurs. Le courant maximum supporté par un supercondensateur Batscap 650F est de 105A. Cette valeur est dépassée lorsque la température descend sous 30,8°C (Figure 5.30).

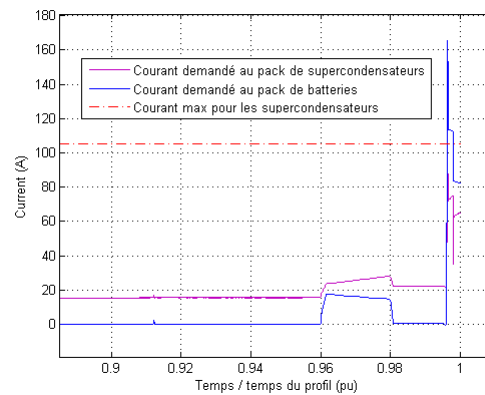


FIGURE 5.30 – Courant demandé en fin de profil aux batteries et aux supercondensateurs à $T=30,8^{\circ}\text{C}$

Plus cette température baisse, moins les batteries peuvent fournir un courant maximum important. Ce sont les supercondensateurs qui fournissent la différence. Le temps de ce pic de courant est inférieur à une seconde. Ce temps court permet aux supercondensateurs de supporter le courant maximum demandé (caractéristique $i_{max_{pulse}} = 875\text{A}$)(figure 5.31).

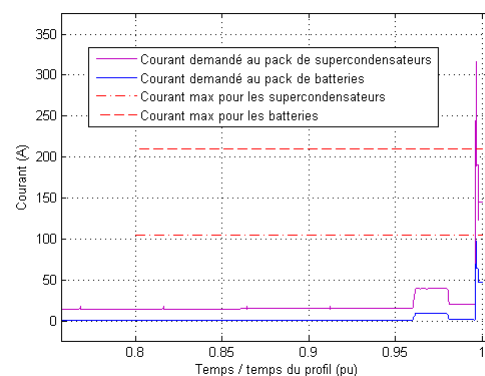


FIGURE 5.31 – Courant demandé en fin de profil aux batteries et aux supercondensateurs à $T=-25^{\circ}\text{C}$

Pour répondre à une demande forte en courant et maintenir la tension de bus DC à 1pu, le nombre de batteries dans le pack est conséquent. Le pack est surdimensionné par rapport à l'énergie qui lui est demandée (Figure 5.32).

La valeur de la fréquence de coupure trouvée par l'optimisation est plus importante que pour toutes autres architectures. Ceci entraîne une sous-utilisation du pack de supercondensateurs (Figure 5.33).

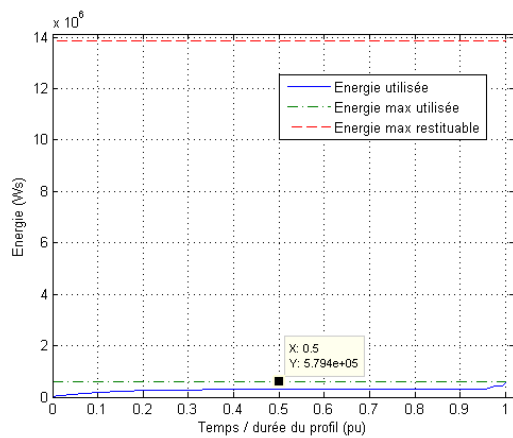


FIGURE 5.32 – Énergie demandée au pack de batteries

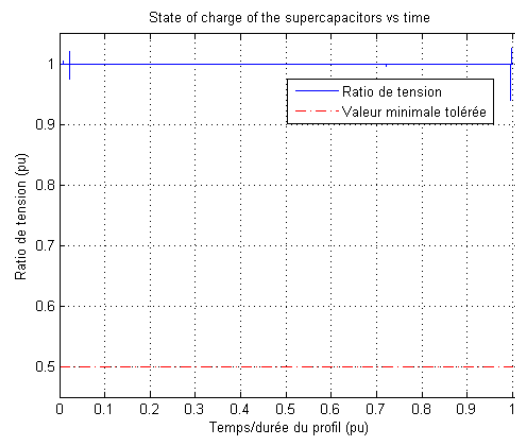


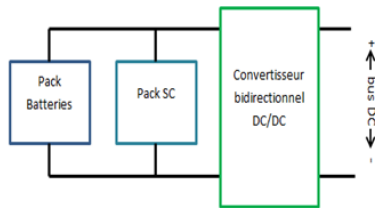
FIGURE 5.33 – Ratio de tension des supercondensateurs durant le profil

Conclusion : Le système étudié répond aux exigences de la gestion d'énergie sur toute la plage de températures.

Malgré une masse faible du système par rapport aux autres architectures, la valeur de tension du bus DC est directement liée à la charge/décharge des batteries et donc ne peut être égale à 1pu sur l'ensemble du profil.

1.7/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS CONNECTÉS À UN CONVERTISSEUR

Architecture "Batteries + SC + convertisseur



Caractéristiques du système obtenu par optimisation

Type de batteries : Kokam 2Ah

Batteries en parallèle : 5

Batteries en série : 52

Nombre de batteries : 260

Type de SC : Batscap 1200F

SC en parallèle : 3

SC en série : 78

Nombre de SC : 234

Masse pack BAT : 13kg

Masse pack SC : 70,2kg

Masse Convertisseur : 24kg

MASSE TOTALE :
107kg

Température minimale : -25°C

Tensions de sortie du pack

Figure 5.34 : Les sorties des deux packs étant connectées ensemble, la tension à leur bornes est identique. La contrainte "a posteriori" sur la tension de sortie à la température minimale fixée par le cahier des charges est respectée ($U_{pack_{min}} \geq 0,5pu$).

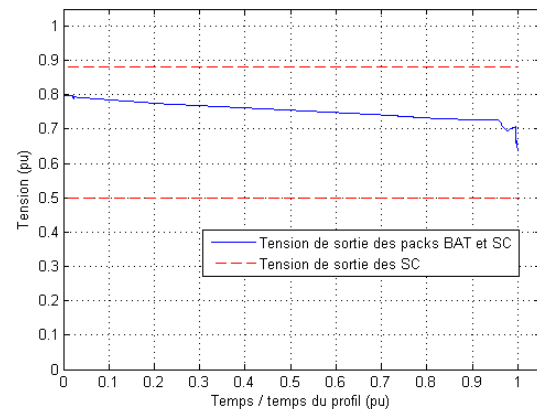


FIGURE 5.34 – Tension de sortie des packs à T=-25°C

Figure 5.35 : Quelle que soit la température externe, la contrainte sur la tension de sortie pour les batteries est respectée.

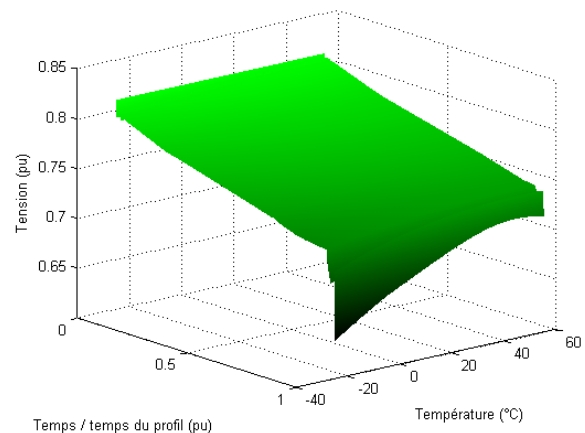


FIGURE 5.35 – Tension de sortie des packs vs température

La contrainte la plus pénalisante est le courant maximum demandé aux packs de batteries.

Le courant maximum supporté par une batterie Kokam 2Ah est de 30A. Le courant maximum toléré par le pack de batteries est de 150A ($5\text{ branches} \times 30\text{A}$).

Le convertisseur Boost DC/DC impose toujours un courant. La répartition des courants entre packs se fait en fonction de leur résistance interne équivalente du moment. Ces résistances sont fonction de l'état de charge et de la température. Ainsi lorsque la valeur de résistance interne du pack de batteries est la plus faible, le courant donné par celui-ci est le plus important.

C'est à ce moment que le courant maximum demandé au pack de batteries ne doit pas excéder son courant maximum toléré (figure 5.36).

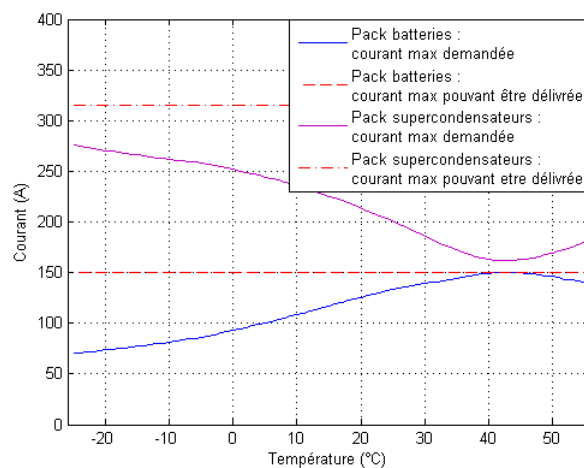


FIGURE 5.36 – Courants maximums de sortie des packs en fonction de la température

Chaque pack devant supporter la tension de sortie de l'autre, le nombre de supercondensateurs en série est imposé par le nombre de batteries en série ou vice versa ($NS_{sc} = \left\lceil \frac{4,2V}{2,8V} \times NS_{bat} \right\rceil$). Ainsi, à chaque branche ajoutée par l'optimisation au pack de supercondensateurs, le nombre de cellules de celui-ci va augmenter considérablement.

Pour restituer le courant manquant demandé par le convertisseur Boost, le nombre de branches du pack de supercondensateurs doit être conséquent, donc sa masse également.

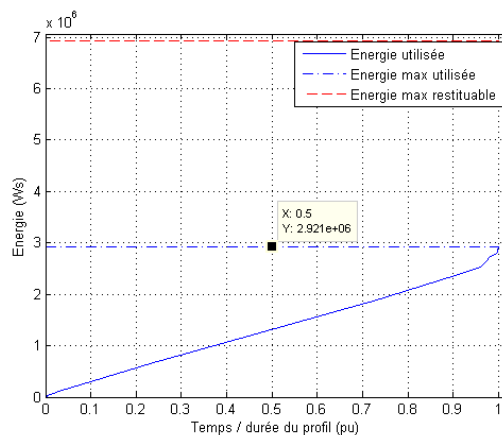


FIGURE 5.37 – Énergie demandée au pack de batteries

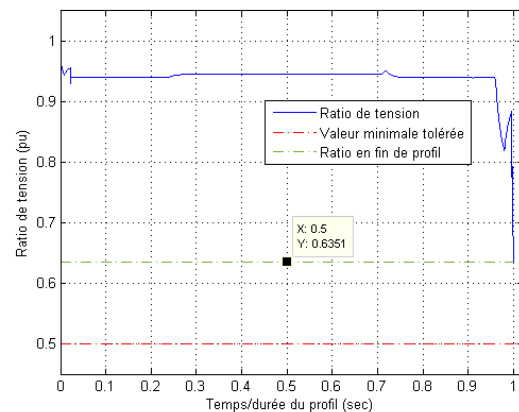


FIGURE 5.38 – Ratio de tension des supercondensateurs durant le profil

Conclusion : Le système étudié répond aux exigences de la gestion d'énergie sur toute la plage de températures.

Par contre, le pack de supercondensateurs doit être capable de supporter la tension de sortie du pack de batteries ainsi que le courant demandé par le convertisseur Boost qui n'est pas satisfait par le pack de batteries. Ceci implique un nombre important de composants dans le pack de supercondensateurs ; donc une contribution de la masse des supercondensateurs à la masse totale conséquente.

2/ VALIDATION DES CARACTÉRISTIQUES TROUVÉES PAR OPTIMISATION

Les résultats sur les six structures ont été trouvés par optimisation à partir de modèles quasi-statiques des composants et les convertisseurs pris en compte par un simple coefficient variable multiplicateur. Cette méthode a permis d'obtenir des temps de calcul d'optimisation par architecture inférieurs à 12 heures. Aussi la structure issue de l'optimisation est évaluée par simulation à partir de modèles plus fin. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par la modélisation afin d'évaluer les écarts.

Suite à quoi, une validation doit être effectuée utilisant une méthode s'approchant de la réalité de fonctionnement. Les modèles dynamiques de composants remplacent les modèles quasi-statiques, une régulation de la tension mais également du courant demandé est mise en place - lorsque le système dispose d'un convertisseur - et les caractéristiques internes du convertisseur Boost DC/DC sont prises en compte.

Pour valider le système, la tension du bus DC ne doit pas descendre de manière prolongée sous 0,88pu. Mais, également, la contrainte la plus pénalisante du système doit être vérifiée et respectée.

2.1/ MODÈLES DYNAMIQUES DES BATTERIES

La batterie basée sur le modèle de Foster (figure 5.39) représente les phénomènes de charge et de décharge. Les phénomènes de diffusion et de relaxation de la batterie ne sont pas pris en compte.

Pour la diffusion, la variation de la valeur du courant de profil demandé aux batteries, à plus fortes raisons pour les architectures disposant d'un pack de supercondensateurs, est moindre (excepté en fin de profil). C'est pourquoi, elle n'est pas prise en compte dans notre modèle de batterie.

Pour la relaxation, les temps de repos - courant demandé nul - sont inexistantes durant le profil.

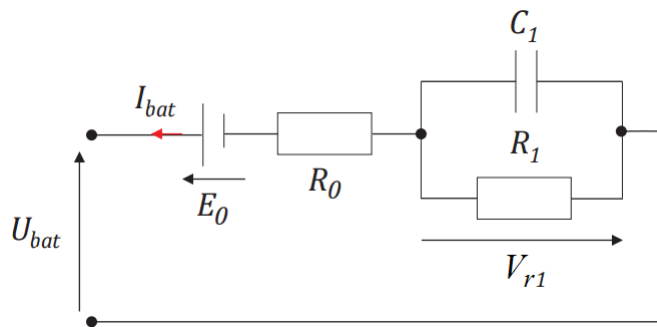


FIGURE 5.39 – Modèle dynamique de batterie basé sur le modèle de Foster - Modèle du premier ordre

Le courant I_{bat} exprimé en fonction de la tension de sortie est égale à :

$$I_{bat} = \frac{E_0 - U_{bat} - V_{r1}}{R_0} \quad (5.1)$$

Impédance du modèle par rapport au modèle quasi-statique

Le modèle dynamique des batteries est moins contraignant que son modèle quasi-statique. Lors de variation de demande de courant aux bornes de la résistance interne du modèle quasi-statique, la chute de tension est plus importante que la chute de tension aux bornes de R_0 en série avec l'ensemble R_1 en parallèle avec C_1 ; le condensateur faisant court-circuit en début de variation (Equation 5.4).

Comparatif des impédances des deux modèles :

— Modèle quasi-statique :

$$Z_{bat_{quasistatique}} = R_0 + R_1 \quad (5.2)$$

— Modèle dynamique :

$$Z_{bat_{dynamique}} = R_0 + \frac{R_1}{1 + jR_1C_1\omega} \quad (5.3)$$

Module de l'impédance

$$|Z_{bat_{dynamique}}| = R_0 + \frac{R_1}{\sqrt{1 + R_1^2 C_1^2 \omega^2}} \quad (5.4)$$

— On constate bien que :

$$\text{Si } f = \frac{\omega}{2\pi} > 0, \quad |Z_{bat_{dynamique}}| < |Z_{bat_{quasistatique}}|$$

avec f fréquence du signal

Les caractéristiques trouvées par l'optimisation utilisent, en fonction de l'architecture électrique, des batteries "Kokam 2Ah" ou "Kokam 4,8Ah". Pour cette dernière, les valeurs de E_0 , R_0 , R_1 et C_1 en fonction de l'état de charge et de la température sont disponible dans la thèse de N. Devillers ([68]). Les caractéristiques de la batterie "Kokam 2Ah" sont à déterminer (Paragraphe 2.2).

2.2/ CARACTÉRISATION DE LA BATTERIE "KOKAM 2AH"

Le circuit équivalent du premier ordre est utilisé pour modéliser une cellule (Figure 5.39). Les caractéristiques internes (E_0 , R_0 , R_1 et C_1) doivent être déterminées. Afin de tenir compte des conditions de fonctionnement réelles, l'influence de la température est étudiée [87].

2.2.1/ BUT ET PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIENCE

L'objectif de l'expérience est de caractériser le modèle équivalent de la batterie selon les différents états de charge (SOC) et de température (T).

Pour cela, une première étape consiste à trouver la capacité réelle C_{bat} aux températures requises. Pour chaque température choisie et à l'aide d'une charge, un profil de courant d'identification est imposé à la batterie. Ceci permet de déterminer les tensions en sortie et donc les différents paramètres internes du modèle de Foster. Sachant que ces paramètres varient en fonction des états de charge et de la température, une approximation ("Fitting") en trois dimensions est réalisée pour trouver les équations de E_0 , R_0 , R_1 et C_1 en fonction de SOC et T .

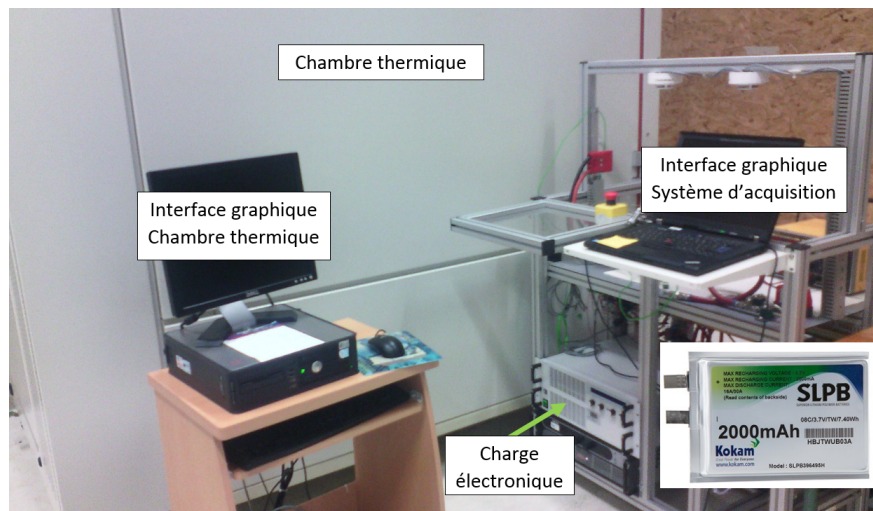


FIGURE 5.40 – Banc chambre thermique et système d'acquisition

2.2.2/ CAPACITÉ DE LA BATTERIE À UNE TEMPÉRATURE SPÉCIFIQUE

À partir d'un courant constant requis de $I_{bat} = 0,5C^8$ et d'une batterie à pleine charge ($SOC_0 = 1$), la tension de sortie de la batterie est mesurée, pour des températures ambiantes de 5°C, 25°C et 45°C (Figure 5.41). Un pas de une seconde est choisi pour chaque expérience.

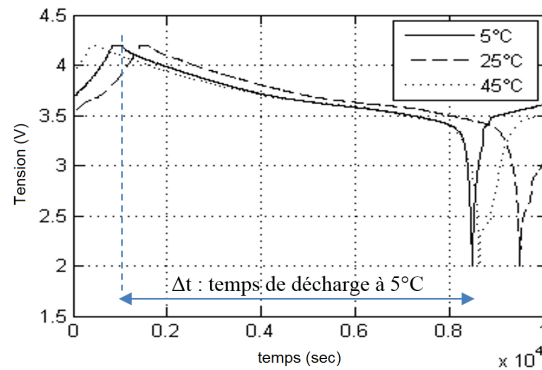


FIGURE 5.41 – Décharge de la batterie à 0,5C à différentes températures

À pleine charge, la tension aux bornes de la batterie est égale à 4,2V. Lorsque la tension de sortie atteint 2V, la batterie est considérée comme complètement déchargée. Le temps de décharge Δt permet d'estimer la capacité réelle C_{bat} de la batterie.

$$C_{bat} = I_{bat} \times \Delta t \quad (5.5)$$

Les trois capacités, trouvées à 5°C, 25°C et 45°C, permettent de déterminer la valeur de l'état de charge de la batterie nécessaire à l'identification des caractéristiques.

2.2.3/ IDENTIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES INTERNES DE LA BATTERIE

Un profil de courant est imposé pour l'identification des paramètres. La réponse en tension aux trois températures différentes est mesurée. Ensuite, il est possible d'estimer la tension en circuit ouvert E_0 , les résistances R_0 , R_1 et le condensateur C_1 en fonction de la température et de l'état de charge de la batterie, comme détaillé ci-dessous. Les résultats expérimentaux ne sont donnés qu'à une température de 5°C, mais la procédure est réitérée à 25°C et 45°C. Ce travail d'identification a été effectué par Tahar Messaoudi, stagiaire au sein du laboratoire Femto-st du 24 avril au 30 juin 2017, en seconde année de DUT GEII, à l'IUT de Belfort-Montbéliard [109]

8. $1C$ correspond au courant pouvant être demandé pendant une heure. Dans notre cas, $1C = 2A$.

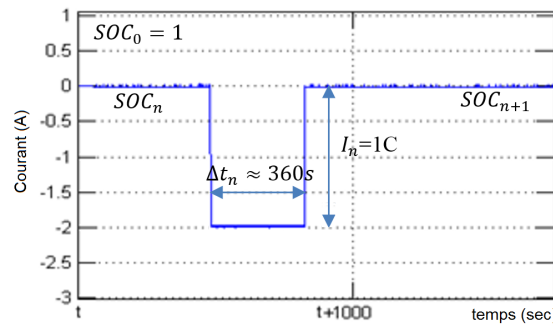


FIGURE 5.42 – Profil du courant d'identification - Répété 7 fois de $SOC_0 = 1$ à $SOC_7 \approx 0,3$ (avec $0 \leq n \leq 6$) [87]

Connaissant la capacité de la batterie à la température T , l'état de charge SOC_{n+1} peut être déduit :

$$SOC_{n+1} = \frac{C_{bat}(T) - \sum_{k=0}^n I_k \cdot \Delta t_k}{C_{bat}(T)} \quad (5.6)$$

Étape 1 : Détermination de la tension à vide E_0 .

La batterie est chargée ($SOC=1$). Un courant de décharge de 1C pendant 6 minutes est demandé. Le nouvel état de charge est de $SOC=0,9$. Après un temps de repos (circuit ouvert) de 15 minutes, la tension mesurée en sortie de batterie représente la tension à vide E_0 en fonction de l'état de charge SOC et de la température T (Figure 5.43) (avec une erreur de l'ordre de 3%⁹).

$$E_0 = f(SOC, T) \quad (5.7)$$

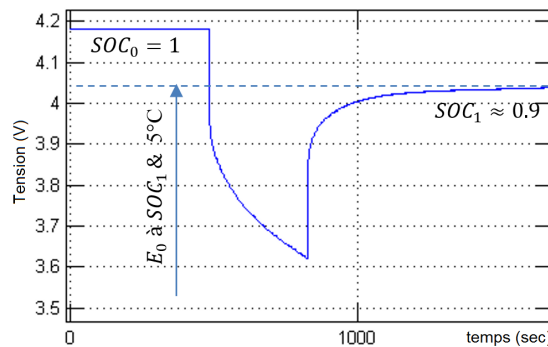


FIGURE 5.43 – Réponse en tension de la batterie à $T = 5^\circ C$ en début de profil de courant d'identification - Détermination de la tension à vide

Étape 2 : Détermination de la valeur de la résistance R_0 .

Dès que le courant demandé passe de 1C à 0C, la tension V_0 aux bornes de R_0 est immédiatement égale à 0V. Ainsi, l'augmentation instantanée de la tension en sortie de batterie permet

9. Pour mesurer la véritable tension à vide, il faut attendre la fin du temps de relaxation. C'est à dire, une durée de l'ordre de plusieurs heures à quelques jours.

de déduire cette tension ($V_0 = \Delta U_0$) (Figure 5.44).

Connaissant le courant d'entrée demandé juste avant son passage à 0C, il est possible de calculer la valeur de $R_0 = f(SOC, T)$

$$R_0(SOC, T) = \frac{\Delta U_0(SOC, T)}{1C} \quad (5.8)$$

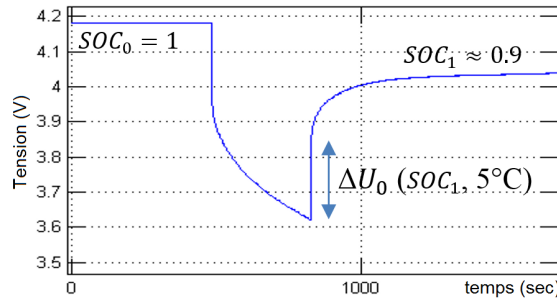


FIGURE 5.44 – Réponse en tension de la batterie à $T = 5^\circ C$ en début de profil de courant d'identification - Détermination de la valeur de résistance R_0 .

ΔU_0 est déterminé par script sous Matlab, en déterminant la dernière valeur de tension avant que le courant ne passe à 0C et la valeur de la tension lorsque la pente de sa montée décroît.

Étape 3 : Détermination des valeurs de la résistance R_1 et du condensateur C_1 s.

Lorsque le condensateur C_1 du circuit équivalent est totalement chargé, le courant demandé par le profil ne traverse que la résistance r_1 . À ce moment, il est possible de connaître la tension ΔU_1 (Figure 5.45).

Connaissant le courant d'entrée demandé juste avant son passage à 0C, on peut en déduire la valeur de $R_1 = f(SOC, T)$, puis de $C_1 = f(SOC, T)$.

$$R_1(SOC, T) = \frac{\Delta U_1(SOC, T)}{1C} \quad (5.9)$$

$$C_1(SOC, T) = \frac{\tau}{R_1(SOC, T)} \quad (5.10)$$

avec τ : temps à 63% de ΔU_1

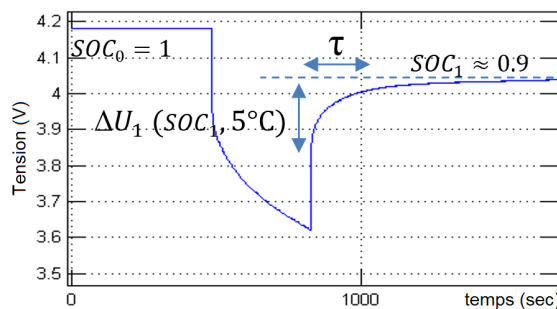


FIGURE 5.45 – Réponse en tension de la batterie à $T = 5^\circ C$ en début de profil de courant d'identification - Détermination des valeurs de résistance R_1 et de condensateur C_1

Le bon fonctionnement de la simulation nécessite que les valeurs de E_0 , R_0 , R_1 et C_1 soient connues à tout moment en fonction de l'état de charge et de la température. Une approximation en 3D (instruction "fit" sous Matlab) est effectuée par rapport aux valeurs trouvées aux différentes températures et état de charge (Table 5.1).

$T = 5^\circ C$							
SOC	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
E_0 (V)	4,185	4,121	3,996	3,901	3,852	3,8	3,754
R_0 (Ω)	0,286	0,301	0,316	0,327	0,35	0,348	0,353
R_1 (Ω)	0,185	0,159	0,135	0,15	0,151	0,164	0,186
C_1 (F)	686,8	723,6	706,5	353,9	257,8	140,7	96,4

$T = 25^\circ C$							
SOC	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
E_0 (V)	4,191	4,149	4,0568	3,959	3,88	3,834	3,779
R_0 (Ω)	0,109	0,112	0,11	0,122	0,124	0,122	0,133
R_1 (Ω)	0,016	0,079	0,073	0,055	0,057	0,044	0,05
C_1 (F)	584,3	893,5	777,1	945,3	919,7	902,6	892,4

$T = 45^\circ C$							
SOC	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
E_0 (V)	4,196	4,154	4,049	3,942	3,854	3,8	3,806
R_0 (Ω)	0,091	0,096	0,096	0,106	0,107	0,105	0,113
R_1 (Ω)	0,01	0,052	0,05	0,037	0,038	0,032	0,04
C_1 (F)	569,7	1039	1042	1057	1003	1105	1058

TABLE 5.1 – Valeurs trouvées pour chaque caractéristique interne de la batterie 2Ah à différents états de charge et température

À partir de ces différentes valeurs, une approximation est réalisée sous Matlab. Les variations des valeurs de E_0 , R_0 , R_1 et C_1 en fonction de l'état de charge et de la température sont représentées sur les figures ci-dessous.

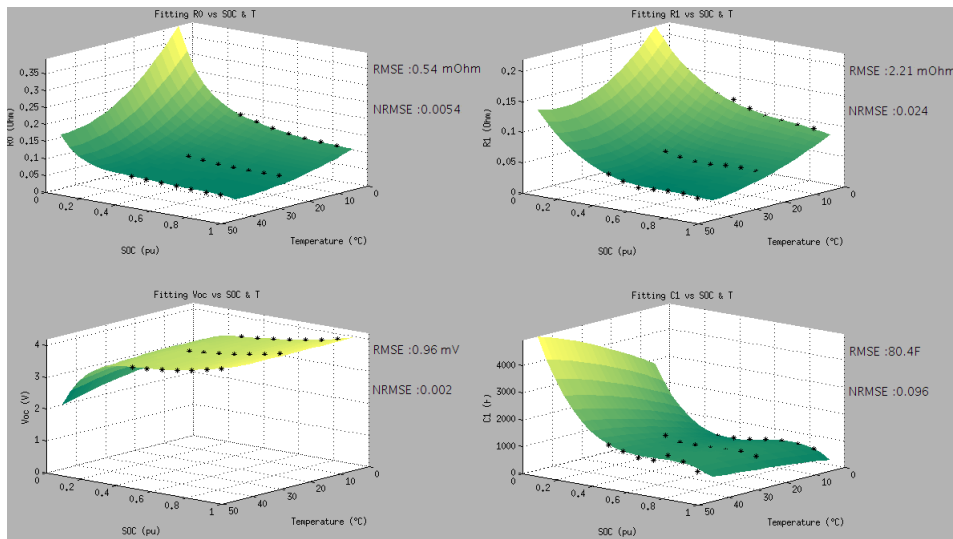


FIGURE 5.46 – Courbes 3D obtenues par approximation des différents points calculés pour E_0 , R_0 , R_1 et C_1 en fonction de l'état de charge et de la température

De cette approximation 3D (Figure 5.46), il en résulte les équations polynomiales pour chaque caractéristique interne :

$$E_0 = 3,512 + 2,215e^{-3}.T - 0,213.SOC - 6,574e^{-5}.T^2 + 2,511.SOC.T + 0,703.SOC^2 \quad (5.11)$$

$$R_0 = 0,463 - 1,874e^{-2}.T - 6,383e^{-3}.SOC + 2,38e^{-4}.T^2 + 2,069e^{-3}.T.SOC - 4,313e^{-2}.SOC^2 \quad (5.12)$$

$$R_1 = 0,551 - 1,465e^{-2}.T - 1,714.SOC + 1,216e^{-4}.T^2 + 2,126.T.SOC + 2,552.SOC^2 - 1,319e^{-5}.T^2.SOC - 1,722e^{-2}.T.SOC^2 - 1,185.SOC^3 \quad (5.13)$$

$$C_1 = 795,6 + 94,3.T - 7751.SOC - 1,43.T^2 - 67,97.T.SOC + 17380.SOC^2 + 1,785.T^2.SOC - 54,51.T.SOC^2 - 9804.SOC^3 \quad (5.14)$$

2.2.4/ RÉSULTATS OBTENUS

Une fois les équations trouvées par approximation, elles sont intégrées dans le sous-système Simulink modélisant la batterie 5.50.

Finalement, la tension de sortie du modèle peut être comparée avec la tension de sortie réelle de la batterie (Figure 5.47).

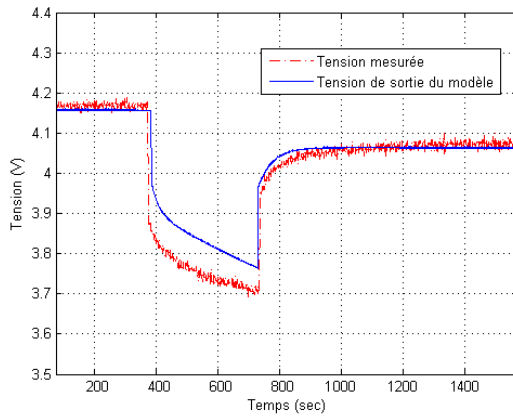


FIGURE 5.47 – Comparaison entre les tensions de sortie réelle et du modèle

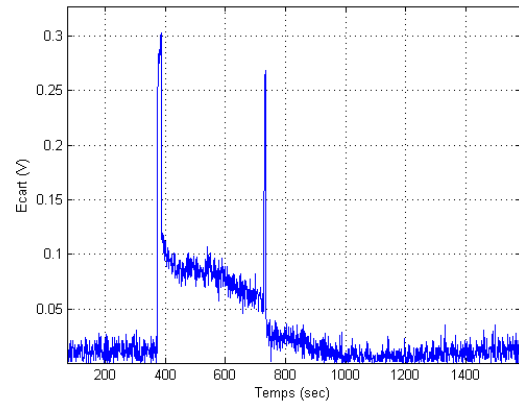


FIGURE 5.48 – Ecart entre les tensions de sortie

L'erreur moyenne quadratique (RMSE) entre courbes est égale à 0.02V, ce qui représente une erreur (NRMSE) de 4,09%.

Selon les caractéristiques du pack de batteries trouvées par optimisation et les caractéristiques dynamiques ainsi trouvées, un diagramme Simulink représentant le pack est généré.

Remarque :

La référence de la batterie Kokam lithium-ion 2Ah n'est pas disponible (Tableau 4.1 - Chapitre 4). Pour l'expérimentation, une batterie de même marque, type et capacité a été caractérisée. Les équations de la tension à vide (E_0), de la résistance ohmique (ou HF) (R_0), de la résistance de transfert de charge (R_1) et de la capacité double couche (C_1) en fonction de la température (T) et de l'état de charge (SOC) ont été déterminées.

L'allure des courbes 3D obtenues des caractéristiques internes (E_0 , R_0 , R_1 et C_1) est similaire aux caractérisations déjà effectuées sur d'autres batteries lithium-ion. Mais, l'amplitude des valeurs des résistances internes est plus importante.

La résistance interne du modèle quasi-statique utilisé par l'optimisation à $T = 20^\circ C$ est égale à $R_{bat} = 0,008\Omega$. Ceci représente une amplitude 25x supérieure à celle trouvée par l'expérimentation ($R_{bat} = R_0 + R_1$ à $T = 20^\circ C$).

C'est pourquoi, lors de la validation de système, les équations obtenues sont utilisées dans nos modèles dynamiques. Sachant que les valeurs de résistances internes sont trop importantes, ces valeurs sont divisées par un coefficient ≤ 25 permettant d'obtenir un état de charge équivalent entre les deux modèles en fin de profil.

2.3/ ASSOCIATION DE BATTERIES EN SÉRIE ET EN PARALLÈLE

Une valeur aléatoire, en fonction des limites fixées par le constructeur, est appliquée aux caractéristiques internes de la batterie, de sorte à "coller" encore davantage à la réalité.

Connaissant les caractéristiques internes électriques des batteries, il est ensuite nécessaire de les regrouper en série et en parallèle pour former le pack souhaité.

Dans le cas de connexions en série, le courant appliqué à chaque batterie est identique. La tension de sortie $U_{pack_{bat}}$ des batteries en série est la somme de chaque tension de sortie des batteries :

$$U_{pack_{bat}} = \sum_{k=1}^{NS_{bat}} U_{bat_k} \quad (5.15)$$

avec NS_{bat} nombre de batteries en série

Dans le cas d'association en parallèle, le courant I_{bat} demandé au pack est réparti entre les différentes branches :

$$I_{bat} = \sum_{j=1}^{NP_{bat}} I_{bat_j} \quad (5.16)$$

avec NP_{bat} nombre de batteries en parallèle

2.3.1/ RÉPARTITION DU COURANT DEMANDÉ DANS CHACUNE DES BRANCHES DU PACK - TENSION DE SORTIE DU PACK

La répartition du courant dans chacune des branches du pack (I_{bat_n}) dépend des caractéristiques internes des batteries. Le courant dans une branche est obtenu par l'équation suivante :

$$I_{bat_n} = \frac{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} (E_{0_{k,n}} - V_{1_{k,n}}) - U_{pack_{bat}}}{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} R_{0_{k,n}}} \quad (5.17)$$

avec n : numéro de la branche dans le pack de batteries
 $E_{0_{k,n}}$: tension à vide de la $k^{ième}$ cellule de la branche n
 $V_{1_{k,n}}$: tension V_1 de la $k^{ième}$ cellule de la branche n
 $R_{0_{k,n}}$: résistance R_0 de la $k^{ième}$ cellule de la branche n

À partir des équations 5.16 et 5.17, la tension de sortie du pack est obtenue :

$$\begin{aligned} I_{bat} &= \sum_{j=1}^{NP_{bat}} \left[\frac{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} (E_{0_{k,n}} - V_{1_{k,n}}) - U_{pack_{bat}}}{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} R_{0_{k,n}}} \right] \\ &= \sum_{j=1}^{NP_{bat}} \left[\frac{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} (E_{0_{k,n}} - V_{1_{k,n}})}{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} R_{0_{k,j}}} \right] - \sum_{j=1}^{NP_{bat}} \left(\frac{U_{pack_{bat}}}{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} R_{0_{k,j}}} \right) \\ \Rightarrow \sum_{j=1}^{NP_{bat}} \left(\frac{U_{pack_{bat}}}{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} R_{0_{k,j}}} \right) &= \sum_{j=1}^{NP_{bat}} \left[\frac{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} (E_{0_{k,n}} - V_{1_{k,n}})}{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} R_{0_{k,j}}} \right] - I_{bat} \\ \Rightarrow U_{pack_{bat}} &= \left[\sum_{j=1}^{NP_{bat}} \left(\frac{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} (E_{0_{k,n}} - V_{1_{k,n}})}{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} R_{0_{k,j}}} \right) - I_{bat} \right] \times \frac{1}{\sum_{j=1}^{NP_{bat}} \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} R_{0_{k,j}}} \right)} \\ \Rightarrow U_{pack_{bat}} &= \left[\sum_{j=1}^{NP_{bat}} \left(\frac{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} E_{0_{k,j}} - \sum_{k=1}^{NS_{bat}} V_{1_{k,j}}}{\sum_{k=1}^{NS_{bat}} R_{0_{k,j}}} \right) - I_{bat} \right] \times R_p \quad (5.18) \end{aligned}$$

avec R_p : résistance équivalente de toutes les résistances R_0 en série et en parallèle

2.3.2/ ASSOCIATION DES BATTERIES EN SÉRIE ET EN PARALLÈLE SOUS MATLAB ET SIMULINK

L'objectif est de construire le pack de batteries correspondant à l'architecture hybride électrique à étudier (Paragraphes 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 et 1.7).

Selon les caractéristiques du pack trouvé par optimisation (NP_{bat} , NS_{bat} et type de batterie utilisée), un sous-système Simulink représentant le modèle dynamique de batterie est copié $NS_{bat} \times NP_{bat}$ fois dans un nouveau schéma Simulink. Chacun de ces sous-ensembles a ses propres caractéristiques C_{bat} , E_0 , R_0 , R_1 et C_1 par rapport à l'état de charge et à la température. Un degré d'incertitude, défini par le fabricant, est appliqué à ces valeurs, afin de tenir compte de l'inhomogénéité existante. Cette valeur d'incertitude est trouvée aléatoirement, uniformément dans l'intervalle donné par le constructeur.

Les connexions entre chaque sous-systèmes Simulink (batteries), se fait automatiquement par un script réalisé sous Matlab.

Le courant requis est distribué sur chaque branche grâce aux équations 5.17 et 5.18 écrites dans un bloc Simulink "Matlab Function" (Figure 5.49). Les entrées de ce bloc sont les différentes tensions, résistances équivalentes renvoyées par chaque branche du paquet. Les sorties représentent les courants requis par branche et la tension de sortie du paquet.

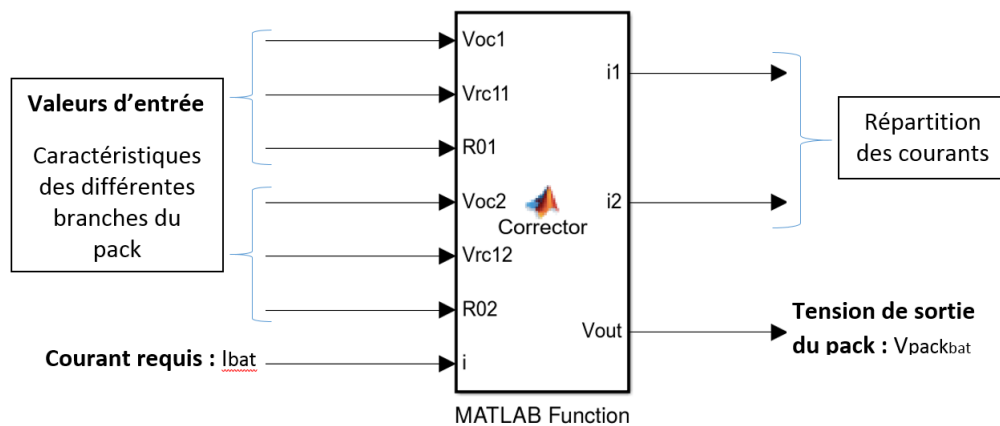


FIGURE 5.49 – Sous Simulink - Répartition des courants et tension de sortie en fonction des caractéristiques des batteries et du courant demandé

Les entrées V_{oc1} , V_{rc1} et R_{01} du bloc "Matlab Function" représentent, respectivement, la somme des tensions E_0 , la somme des tensions aux bornes de C_1 et R_1 , la somme des résistances R_0 de la première branche. Il en va de même pour la seconde branche avec les entrées V_{oc2} , V_{rc2} et R_{02} . Toutes ces valeurs se retrouvent dans l'équation 5.18 sous forme de somme allant de $k = 1$ à NS_{bat} , permettant de déterminer la tension de sortie du pack.

L'exemple ci-dessous montre le pack ainsi créé avec deux branches de cinq batteries en série (Figure 5.50). L'association électrique entre branches est obtenue grâce à un bloc "Matlab Function" qui permet de répartir les courants dans les deux branches.

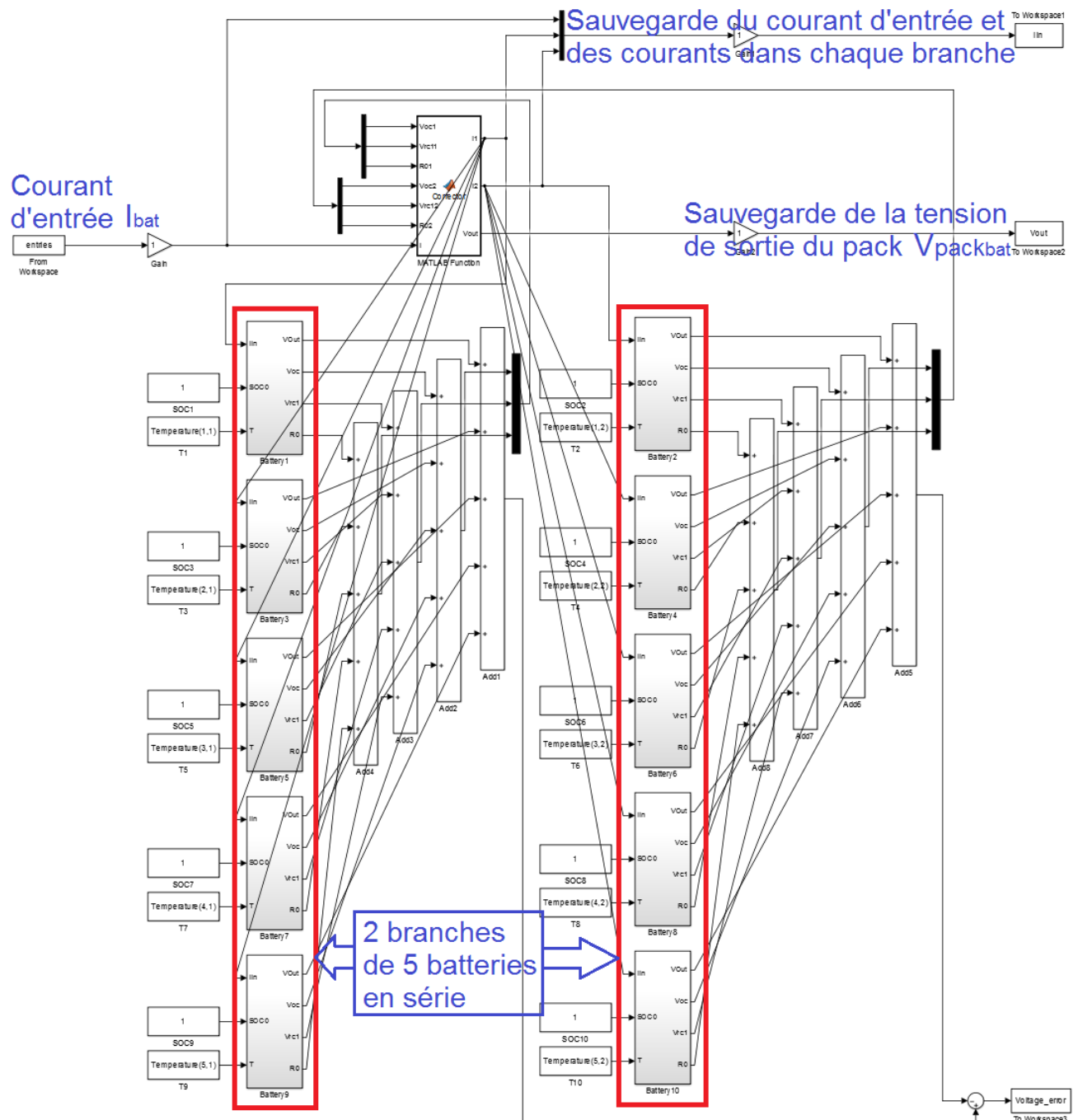


FIGURE 5.50 – Exemple de schéma Simulink de pack de batteries généré

Il reste à intégrer ce pack généré sous forme de sous-ensemble, appelé "BAT source", dans le schéma global de simulation (Paragraphe 2.6), pour validation.

2.4/ MODÈLES DYNAMIQUES DES SUPERCONDENSATEURS

Le modèle de supercondensateur de Zubieta & Bonert (figure 5.51) représente les phénomènes de charge et de décharge, de redistribution des charges et de l'auto-décharge. L'auto-décharge n'est pas prise en compte étant donnée que l'étude du système se fait uniquement sur la durée d'un courant de profil de plusieurs minutes; durée trop courte pour qu'elle soit significative.

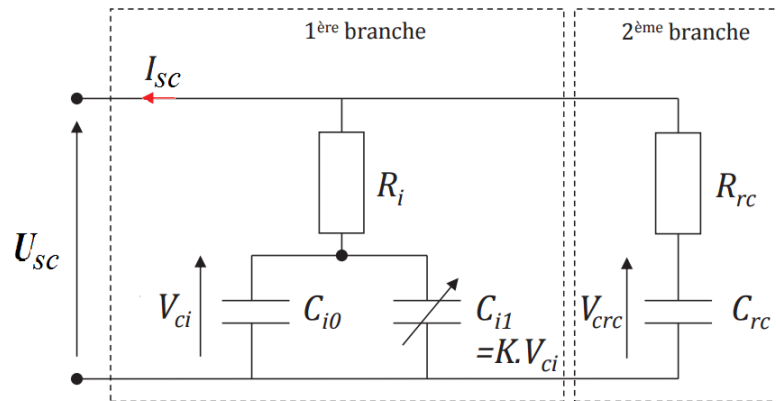


FIGURE 5.51 – Modèle de Zubieta-Bonert à deux branches d'un supercondensateur

La constante de temps de la première branche, fonction de R_i , C_{i0} et $C_{i1} = K.V_{ci}$, est de l'ordre de la seconde.

La seconde branche représente les phénomènes de redistribution des charges lorsque le courant demandé est nul après une période de charge-décharge. Sa constante de temps, fonction de R_{rc} et C_{rc} , est de l'ordre de la minute.

Le courant I_{sc} exprimé en fonction de la tension de sortie est égal à :

$$I_{sc} = \frac{V_{ci} - U_{sc}}{R_i} + \frac{V_{crc} - U_{sc}}{R_{rc}} \quad (5.19)$$

Les caractéristiques du pack trouvées par l'optimisation utilisent, en fonction de l'architecture électrique, des supercondensateurs "Batscap 650F" ou "Batscap 1200F". Les grandeurs de ces supercondensateurs sous forme de modèle de Zubieta-Bonert (Tableau 5.2) sont disponibles dans le manuscrit de thèse de N. Devillers [68].

TABLE 5.2 – Exemple de caractéristiques de modèle de Zubieta-Bonert de supercondensateur

Batscap 650F						
Température (°C)	-18	-5	10	25	37	50
$R_i(m\Omega)$	1,48	1,37	1,18	1,32	1,01	1,05

$C_{i0}(F)$	$K(F/V)$	R_{rc}	C_{rc}
570	90	10	10

2.5/ ASSOCIATION DE SUPERCONDENSATEURS EN SÉRIE ET EN PARALLÈLE

Le pack de supercondensateurs est créé en utilisant le même principe que précédemment. Seul le bloc Matlab de répartition des courants dans chaque branche diffère (Paragraphe 2.5.1). Pour les associer en série, le courant appliqué à chaque supercondensateur est identique. La tension de sortie V_{scout} des supercondensateurs en série est la somme de chaque tension de sortie des supercondensateurs (V_{scout_k}) dans une branche :

$$U_{scout} = \sum_{k=1}^{NS_{sc}} U_{scout_k} \quad (5.20)$$

avec NS_{sc} nombre de supercondensateurs en série

Dans le cas d'associations en parallèle, le courant I_{sc} demandé au pack est distribué entre les différentes branches :

$$I_{sc} = \sum_{j=1}^{NP_{sc}} I_j \quad (5.21)$$

avec NP_{sc} nombre de supercondensateurs en parallèle

2.5.1/ RÉPARTITION DU COURANT DEMANDÉ DANS CHACUNE DES BRANCHES DU PACK - TENSION DE SORTIE DU PACK

La répartition du courant dans chacune des branches 1 à n du pack (I_{sc_n}) dépend des caractéristiques internes des supercondensateurs. Le courant dans une branche est obtenu par l'équation suivante :

$$I_{sc_n} = \frac{V_{R_{i,1n}}}{R_{i,1n}} + \frac{V_{R_{rc,1n}}}{R_{rc,1n}} \quad (5.22)$$

avec n : numéro de la branche dans le pack de supercondensateurs

$R_{i,1n}$: résistance R_i de la 1^o cellule de la branche n

$V_{R_{i,1n}}$: tension aux bornes de $R_{i,1n}$

$R_{rc,1n}$: résistance R_{rc} de la 1^o cellule de la branche n

$V_{R_{rc,1n}}$: tension aux bornes de $R_{rc,1n}$

Les valeurs $V_{R_{i,1n}}$ et $V_{R_{rc,1n}}$ sont trouvées respectivement de la manière suivante :

$$V_{R_{i,1n}} = U_{pack_{sc}} - V_{ci,1n} - \sum_{k=2}^{NS_{sc}} V_{sc,kn} \quad (5.23)$$

$$V_{R_{rc,1n}} = U_{pack_{sc}} - V_{rc,1n} - \sum_{k=2}^{NS_{sc}} V_{sc,kn} \quad (5.24)$$

avec $V_{pack_{sc}}$: tension en sortie de pack

$V_{sc,kn}$: tension de sortie de la $k^{ième}$ cellule de la branche n

À partir des équations 5.22, 5.23 et 5.24, la tension de sortie du pack est obtenue comme suit :

$$\begin{aligned}
 I_{pack_{sc}} &= \sum_{j=1}^{NP_{sc}} I_{sc_j} \\
 &\text{, avec } I_{pack_{sc}} : \text{courant délivré par le pack} \\
 &\text{et } I_{sc_j} : \text{courant délivré par la branche } j \\
 &= \sum_{j=1}^{NP_{sc}} \left(\frac{V_{Ri,1j}}{R_{i,1j}} + \frac{V_{Rrc,1j}}{R_{rc,1j}} \right) \\
 &= \sum_{j=1}^{NP_{sc}} \left(\frac{U_{pack_{sc}} - V_{ci,1j} - \sum_{k=2}^{NS_{sc}} U_{sc_k}}{R_{i,1j}} + \frac{U_{pack_{sc}} - V_{crc,1j} - \sum_{k=2}^{NS_{sc}} U_{sc_k}}{R_{rc,1j}} \right)
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

$$\Rightarrow U_{pack_{sc}} = \frac{\sum_{j=1}^{NP_{sc}} \left(\frac{\sum_{k=2}^{NS_{sc}} U_{sc_k}}{R_{i,1j} // R_{rc,1j}} + \frac{V_{ci,1j}}{R_{i,1j}} + \frac{V_{crc,1j}}{R_{rc,1j}} \right) - I_{pack_{sc}}}{\sum_{j=1}^{NP_{sc}} \left(\frac{1}{R_{i,1j}} + \frac{1}{R_{rc,1j}} \right)} \tag{5.26}$$

$$\text{avec } R_{i,1j} // R_{rc,1j} = \frac{1}{\frac{1}{R_{i,1j}} + \frac{1}{R_{rc,1j}}}$$

Enfin, connaissant la tension de sortie du pack, le courant demandé au pas suivant à chaque branche n peut être déterminé en fixant la variable j de l'équation 5.25 ($j = n$). On a :

$$I_{sc_n} = \frac{U_{pack_{sc}} - V_{ci,1n} - \sum_{k=2}^{NS_{sc}} U_{sc_k}}{R_{i,1n}} + \frac{U_{pack_{sc}} - V_{crc,1n} - \sum_{k=2}^{NS_{sc}} U_{sc_k}}{R_{rc,1n}} \tag{5.27}$$

2.5.2/ ASSOCIATION DES SUPERCONDENSATEURS EN SÉRIE ET EN PARALLÈLE SOUS MATLAB ET SIMULINK

De même que pour le pack de batteries, selon l'architecture électrique choisie, un sous-système Simulink représentant le modèle de Zubieta-Bonert de supercondensateur est copié $NS_{sc} \times NP_{sc}$ fois dans un nouveau schéma Simulink. Chaque sous-système dispose de ses propres caractéristiques R_i , C_{i0} , K (pour déterminer C_{i1}), R_{rc} , et C_{rc} en fonction d'une marge d'erreur définie par le constructeur.

Le courant requis est distribué sur chaque branche grâce à l'équation 5.27 et la tension de sortie du pack est calculée grâce à l'équation 5.26 ; toutes deux écrites dans un bloc Simulink "Matlab Function" (Figure 5.52).

Les entrées de ce bloc sont les différentes tensions et résistances équivalentes renvoyées par chaque première cellule des branches du pack, ainsi que les différentes tension de sortie des branches en parallèle du pack. Les sorties du "répartiteur de courant" représentent les courants requis par branche et la tension de sortie du pack.

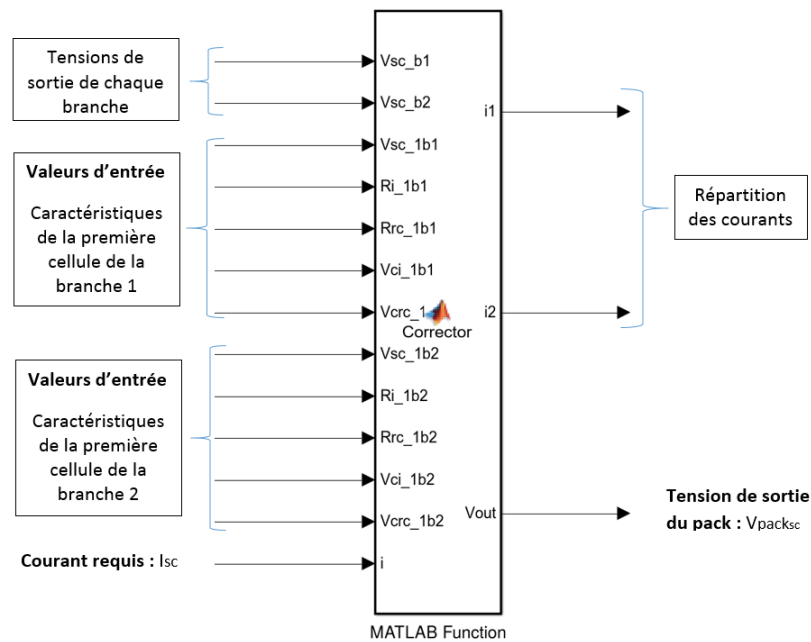


FIGURE 5.52 – Sous Simulink - Répartition des courants et tension de sortie en fonction des caractéristiques des supercondensateurs et du courant demandé

L'exemple ci-dessous montre le pack ainsi créé avec deux branches en parallèle de cinq supercondensateurs en série (Figure 5.53).

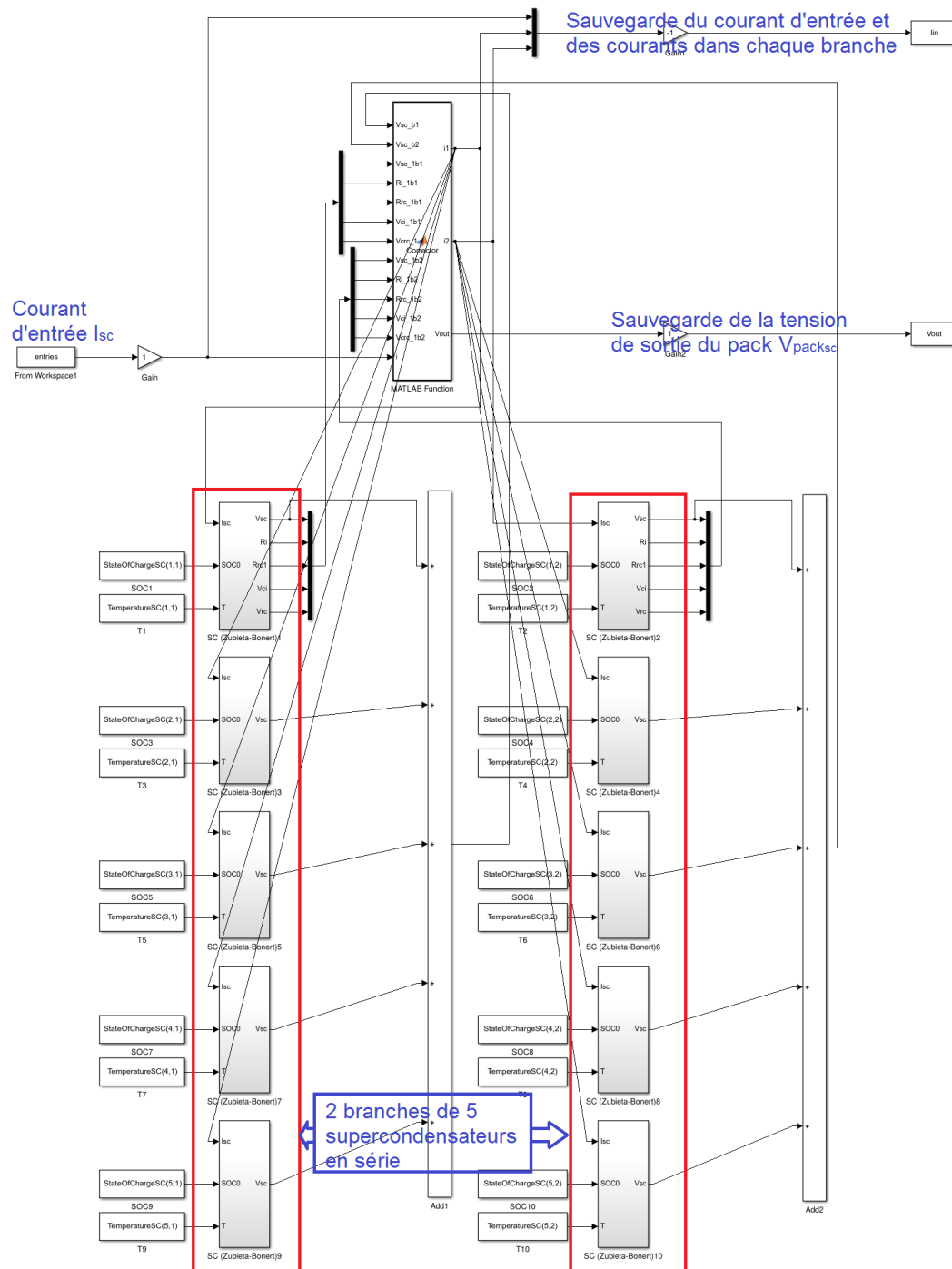


FIGURE 5.53 – Exemple de schéma Simulink de pack de supercondensateur généré

Il reste à intégrer le pack généré sous forme de sous-ensemble, appelé "SCAP source", dans le schéma global de simulation (Paragraphe 2.6).

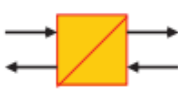
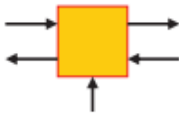
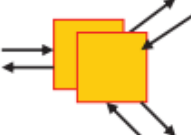
2.6/ VALIDATION DU SYSTÈME PAR REPRÉSENTATION ÉNERGÉTIQUE MACROSCOPIQUE (REM)

La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) décrit graphiquement, de manière fonctionnelle, des systèmes complexes et leur commande. Elle est basée sur le principe d'action et de réaction des éléments qui y sont connectés.

L'application aux systèmes hybrides paraît particulièrement pertinente car cette représentation offre naturellement de nombreuses combinaisons et interactions.

Ainsi, cette méthode permet de structurer la modélisation de nos systèmes et d'en définir une structure de commande. Les sources, les charges, les éléments d'accumulation et éléments de conversion sont représentés de la manière suivante (Tableau 5.3).

TABLE 5.3 – Éléments de la REM

Élément	Source d'énergie	Accumulateurs d'énergie	Convertisseurs d'énergie (avec réglage)	Couplage (inter-domaine)
Représentation				

La REM appliquée à nos différentes architectures électriques fait apparaître les paramètres de réglages pour gérer le courant demandé aux différents packs disponibles (sources d'énergie). Ces réglages permettent de commander les convertisseurs et ainsi de réguler la tension du bus DC.

Pour rappel, l'objectif sur un aéronef est la minimisation de la masse des dispositifs à embarquer tout en disposant de suffisamment de puissance électrique pour répondre à la phase de démarrage.

Ces systèmes trouvés par optimisation répondent aux différents critères énoncés dans le chapitre (4) "Optimisation". Un rendement de convertisseur constant a été considéré de 95%.

Pour la validation par simulation, il est indispensable que notre système REM soit au plus proche de la réalité de fonctionnement. Dans le nouveau schéma de simulation, les pertes dans les convertisseurs sont traduites :

- Par effet Joule, par la résistance de l'inductance de la bobine du convertisseur Boost DC/DC.
- Par effet Joule, par la résistance du condensateur de filtrage en sortie du convertisseur Boost DC/DC.
- Par perte de commutation des composants du convertisseur. Pour simuler ces dernières un coefficient de 2% est appliqué en sortie de convertisseur [17] [23].

Les résultats obtenus par le schéma de simulation détaillé sont comparés à ceux obtenus grâce aux modèles quasi-statiques introduits dans l'algorithme d'optimisation.

Les prochains paragraphes présentent les schémas REM, les tensions de sortie obtenues pour les différents packs, comparées aux courbes de tensions utilisées lors de l'optimisation, la tension obtenue sur le bus DC pour chaque architecture électrique choisie et, pour les systèmes hybrides (Batteries + supercondensateurs), les courants demandés à chaque pack.

2.6.1/ SYSTÈME PACK DE BATTERIES SEULES

Le pack de batteries seul alimente directement le bus. Aucun contrôle de la tension n'est possible. Sur la figure 5.54 représentant, respectivement, le schéma REM et le principe de fonctionnement du système, la charge impose directement un courant au pack de batteries. La tension de sortie du pack représente la tension qui est retrouvée sur le bus.

Le pack est composé de batteries "Kokam 4,8Ah".

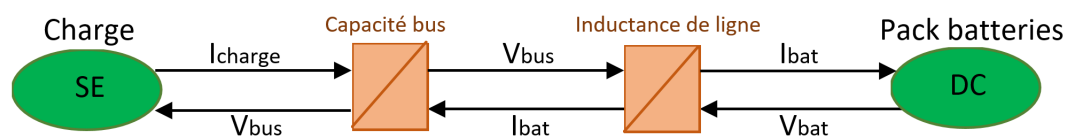


FIGURE 5.54 – Validation - Modèle REM du système

La tension minimale sur le bus est toujours supérieure à 0,88pu (Figure 5.55), limite fixée par le cahier des charges. Mais du fait de ne disposer d'aucun contrôle et de la décharge des batteries, cette valeur de tension de bus de 1pu nominale ne peut pas être respectée.

A courant constant, les tensions en sortie du pack de batteries sont similaires. En fin de profil, le courant demandé augmente brutalement. La résistance interne du modèle quasi-statique étant plus importante lors de variations de courant (Equation 5.4), la tension de sortie décroît davantage que pour le modèle dynamique (Figure 5.56). La valeur minimale de température trouvée par l'optimisation pour un bon fonctionnement est une limite "haute" du système.

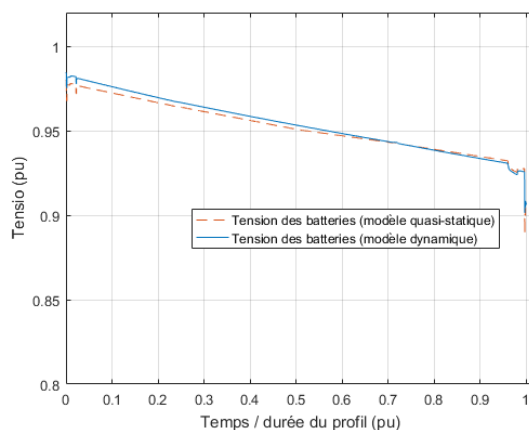


FIGURE 5.55 – Validation - Tension en sortie du pack de batteries (donc du bus)

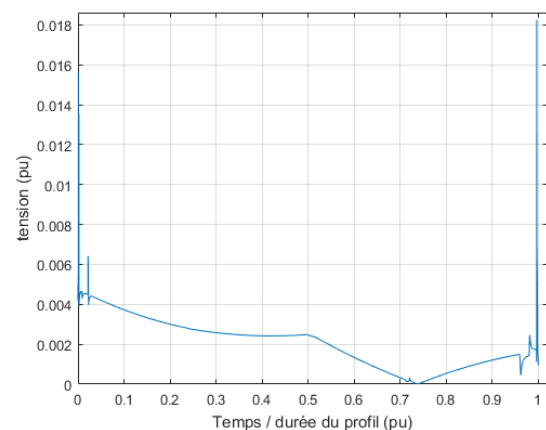


FIGURE 5.56 – Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique

Conclusion : Le modèle dynamique intégré dans une Représentation Énergétique Macroscopique vérifie la faisabilité du système trouvé lors de l'optimisation. Du fait d'un modèle dynamique moins contraignant, la température minimale trouvée pour un bon fonctionnement lors de l'optimisation peut être sensiblement abaissée.

2.6.2/ SYSTÈME PACK DE BATTERIES AVEC CONVERTISSEUR

Le pack est composé de batteries "Kokam 4,8Ah". La liaison entre pack de batteries et charge est faite par l'intermédiaire du convertisseur Boost DC/DC et de sa commande. Ainsi, la tension du bus DC est régulée (Figure 5.57).

Un écart important entre la tension de référence et la tension du bus peut entraîner une demande de courant trop importante aux batteries. Pour éviter cela, une régulation de courant est également effectuée.

Le système assure ces contrôles par une boucle de tension et une boucle de courant. La correction de ces valeurs en fonction de références est réalisée par deux correcteurs IP.

L'utilisation de contrôleurs IP améliore la réponse dynamique du système et réduit le dépassement de pics par rapport aux contrôleurs PI [71] [80]. Ce dernier point est important car le dépassement toléré par rapport à la tension nominale sur le bus est faible ($U_{bus_{max}} = 1,02pu$).

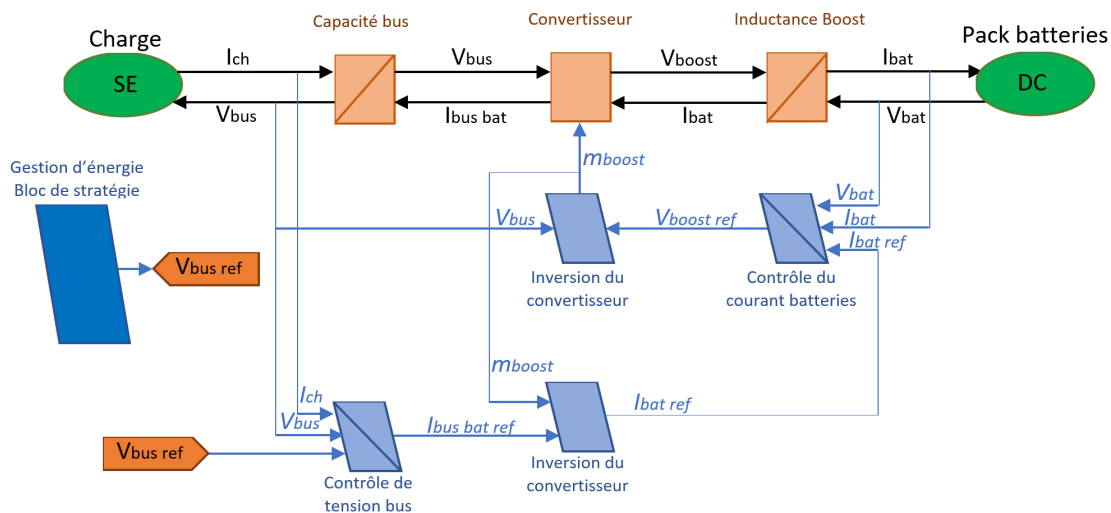


FIGURE 5.57 – Validation - Modèle REM du système

Les courbes obtenues sont comparées avec le système quasi-statique.

Pour rappel, l'étude du système a montré que lors de la simulation par les modèles quasi-statiques, la tension du bus doit être stabilisée autour de la valeur de 1pu, la tension en fin de profil en sortie de pack de batteries supérieure à 0,5pu. La contrainte la plus pénalisante de ce système est le courant devant être délivré par le pack (Figure 5.7).

Les figures 5.58 5.59) montrent le résultat de la simulation. La tension en fin de profil reste supérieure à 0.5pu. Il est possible de maintenir une tension autour de 1pu sur le bus. L'erreur quadratique de la tension du bus par rapport à 1pu est de 0.05pu.

L'écart de tension de sortie entre modèle quasi-statique et modèle dynamique des batteries

est faible. Lors de chaque variation de courant demandé, la résistance R_1 en parallèle avec le condensateur C_1 du schéma dynamique a moins d'influence (Equation 5.4). C'est pourquoi, l'état de charge des batteries du système dynamique est moins altéré (Figures 5.60(a)(b)) et le courant demandé toujours plus faible (Figures 5.61(a)(b)).

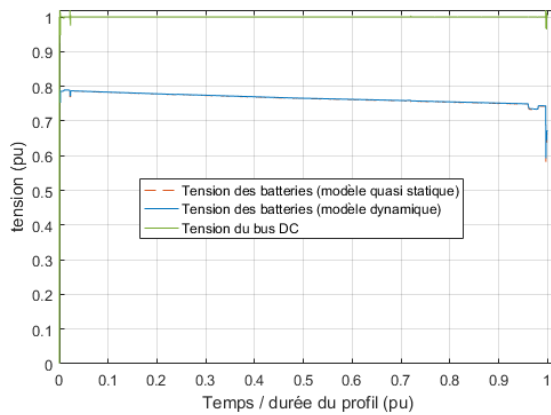


FIGURE 5.58 – Validation - Tension en sortie du pack de batteries

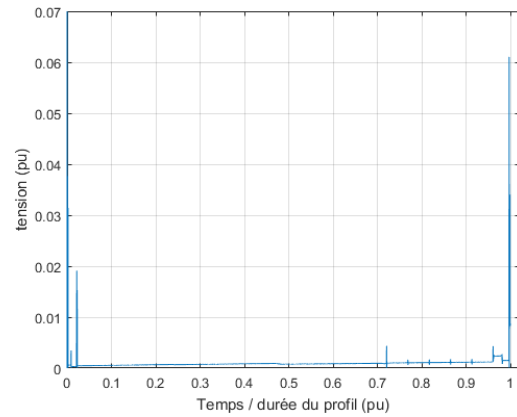


FIGURE 5.59 – Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique

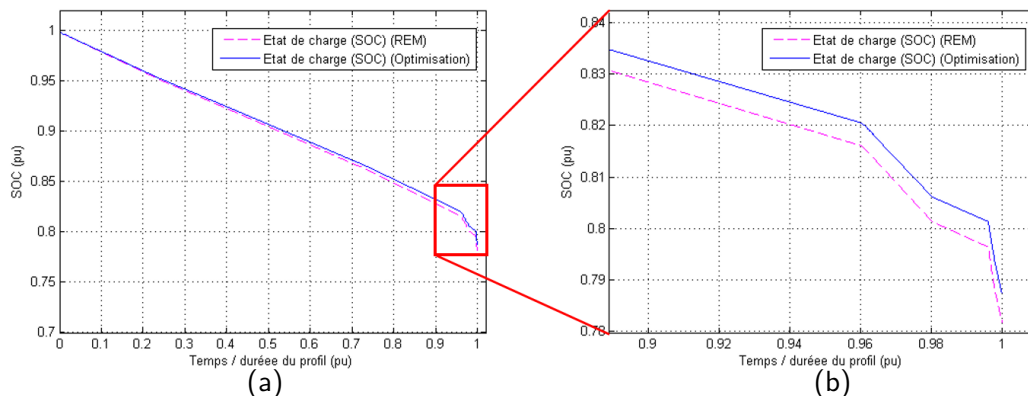


FIGURE 5.60 – Validation - Comparatif entre SOC avec les packs de batteries quasi-statiques et dynamiques

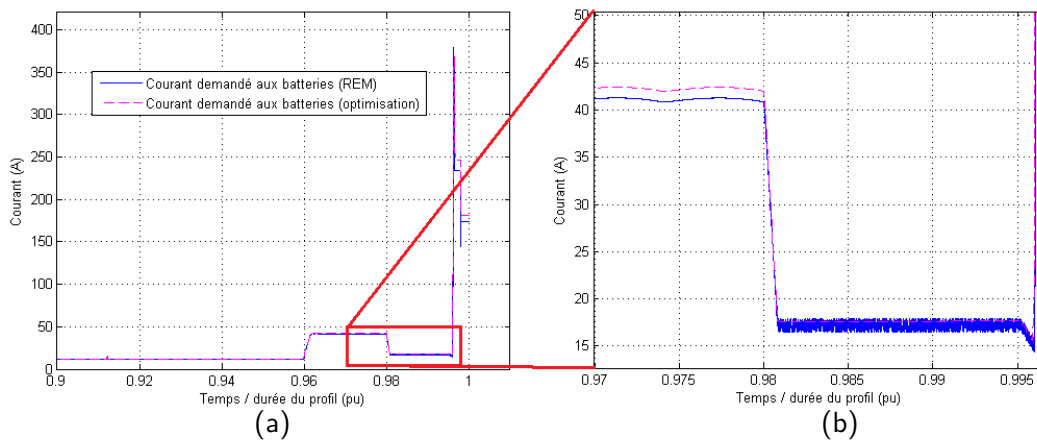


FIGURE 5.61 – Validation - Courant demandé au pack - Comparatif entre courants avec le pack de batteries quasi-statiques et dynamiques

Par contre, en fin de profil lors de la demande en puissance, le courant demandé au pack est plus important pour le modèle dynamique (Figure 5.62(a)) ($\Delta I = 10A$).

Le fait d'incorporer une régulation de courant, lors du pic de montée en fin de profil, le temps de réaction du correcteur IP (transition entre un état et le suivant) fait que le courant maximum demandé est dépassé avant de le réguler et de se retrouver en régime permanent (Figure 5.62). Le courant maximum supporté par le pack représente la contrainte la plus pénalisante de cette architecture. Sa valeur est de 384A. Avec la régulation, le courant maximum demandé au pack est de 382A. Malgré une valeur de courant maximale demandée avoisinante la valeur maximale tolérée, le système peut être validé. La batterie dispose également d'une caractéristique de type " $I_{pulse_{max}}$ " (courant max toléré durant moins d'une seconde). Le laps de temps ($< 15ms$) de dépassement du courant max n'a pas d'incidence.

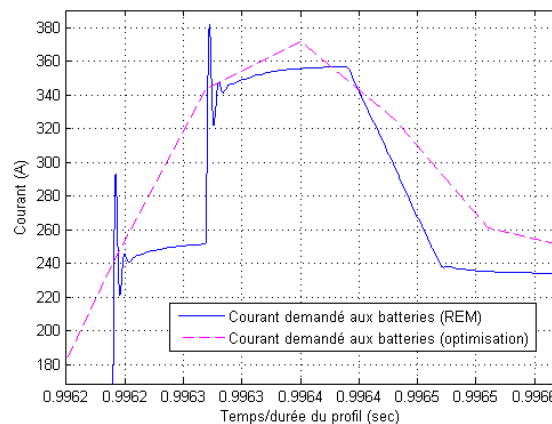


FIGURE 5.62 – Validation - Zoom sur le courant demandé lors du pic en fin de profil

Conclusion : Le fonctionnement de ce système avec un modèle dynamique du pack de batteries ou quasi-statique est très similaire. Sachant que les batteries disposent d'une caractéristique de courant maximum d'impulsion ($I_{pulse_{max}}$) pendant une seconde, la contrainte la plus pénalisante, c'est à dire le courant demandé est respectée.

Cette architecture électrique est sensible aux variations de température. Pour répondre au profil de courant de démarrage de l'aéronef, il reste à prévoir un système maintenant une température supérieure à 35°C.

2.6.3/ SYSTÈME PACK DE BATTERIES AVEC CONVERTISSEUR ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS AVEC CONVERTISSEUR

Pour cette architecture, les deux sources sont composées de batteries "Kokam 2Ah" et de supercondensateurs de "Batscap 650F". Une régulation de tension et de courant est réalisée pour chacun des packs de composants. La correction des valeurs demandées en fonction de références est toujours réalisée par correcteur IP (Figure 5.63).

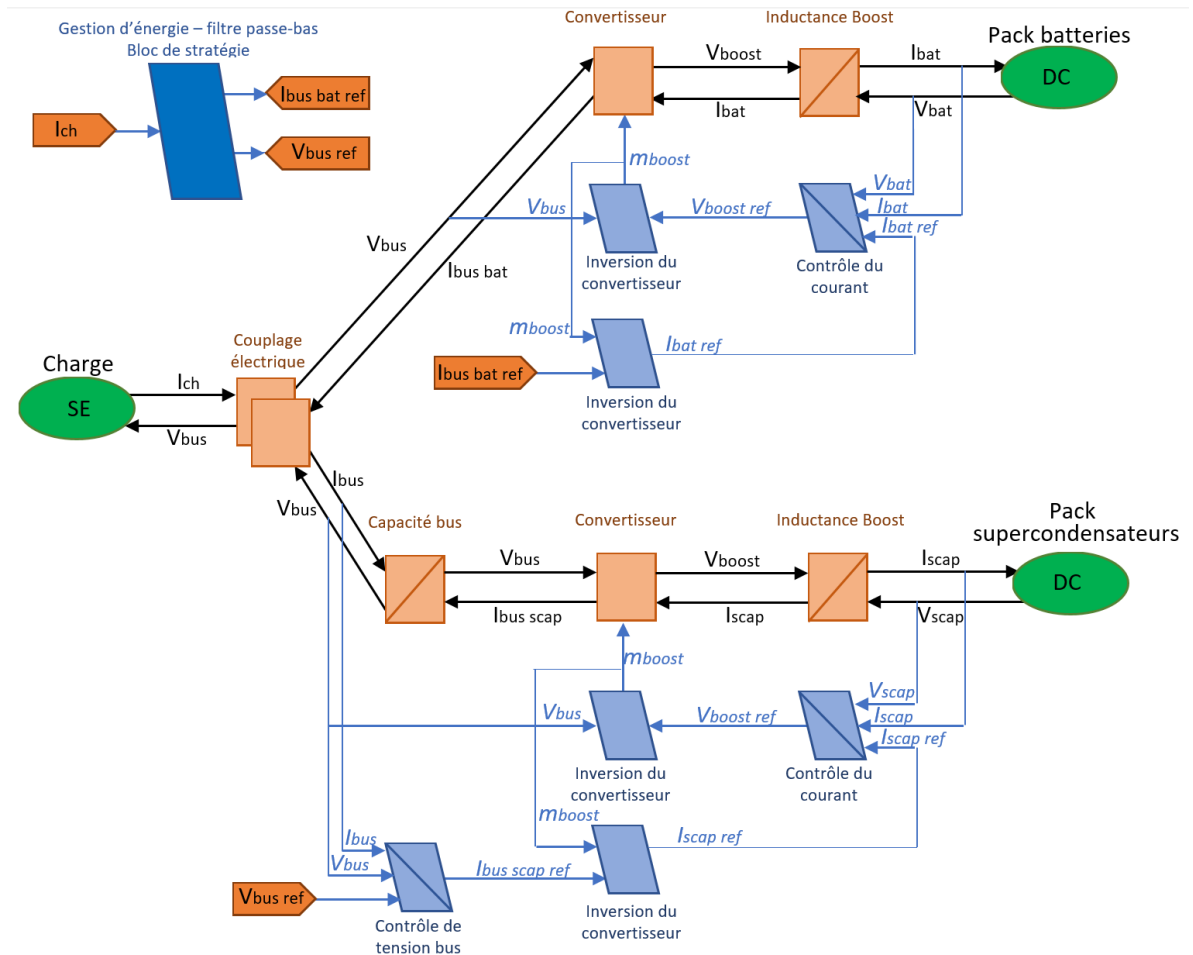


FIGURE 5.63 – Validation - Modèle REM du système

La répartition du courant demandé à chaque pack est réalisée par un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est donnée par l'algorithme d'optimisation. Les batteries répondent

à la composante continue et aux fréquences inférieures à la fréquence de coupure f_c ; les supercondensateurs répondant aux fréquences supérieures à f_c .

Pour rappel, les caractéristiques internes du modèle de batteries utilisées pour la validation diffèrent du modèle initial (Paragraphe 2.2.4). Sa résistance interne est plus élevée ($\times 25$). En l'état, la tension de sortie en fin de profil est inférieure à 0,5pu. C'est pourquoi, on recherche un coefficient diviseur pour les résistances (R_0 et R_1), à partir duquel le système est fonctionnel. Si ce coefficient est inférieur à 25, l'architecture peut être validée.

La contrainte sur la tension de sortie est respectée (Figure 5.64) pour un coefficient diviseur égale à 18. Une comparaison entre l'allure de la tension obtenue du bus et les 1pu souhaités est réalisée. L'erreur quadratique (RMSE) trouvée est de 0.029pu.

Le courant demandé au pack de supercondensateurs est fonction de l'écart de tension entre le bus DC et sa valeur de 1pu nominale. L'inductance du convertisseur Boost DC/DC en sortie des batteries n'a pas une résistance nulle ($R \simeq 10m\Omega$). La chute de tension qui en découle, nécessite une faible demande de courant aux supercondensateurs lors des phases à courant constant ($\simeq 0.5A$).

Cette baisse n'est pas prise en compte lors de l'optimisation. Pour le schéma REM, la tension aux bornes des supercondensateurs décroît (Figure 5.65).

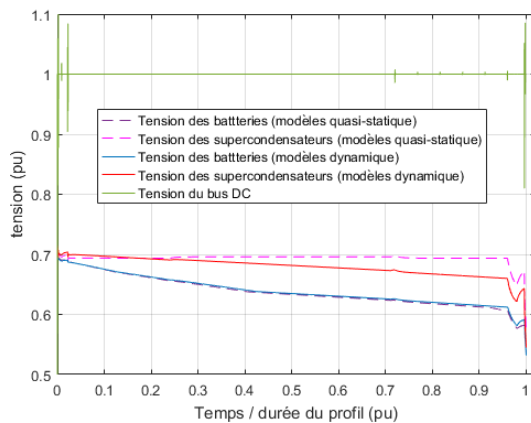


FIGURE 5.64 – Validation - Tensions en sortie des pack de batteries et de supercondensateurs

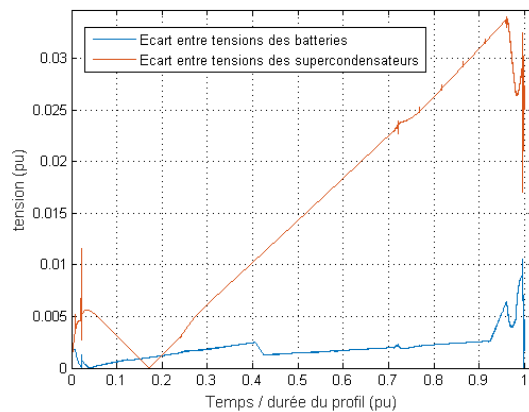


FIGURE 5.65 – Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique du schéma REM

Les courants maximums demandés aux packs de batteries et de supercondensateurs sont inférieurs à leur valeur maximale tolérée, respectivement $3 \times 30A$ et $3 \times 105A$ (Figure 5.66). L'état de charge des batteries et le ratio de tension des supercondensateurs en fin de profil sont bien respectivement supérieurs à 0,1 et 0,5 (valeurs limites tolérées) (Figure 5.67).

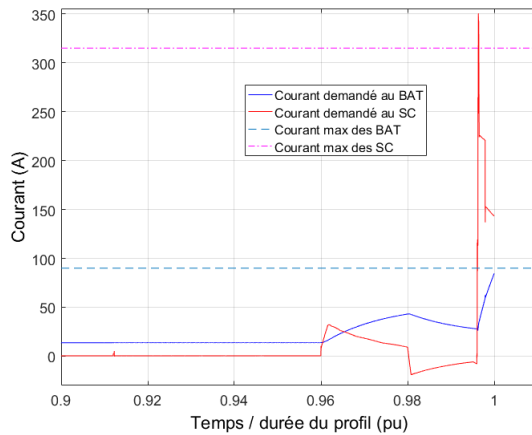


FIGURE 5.66 – Validation - Courants demandés aux packs en fin de profil

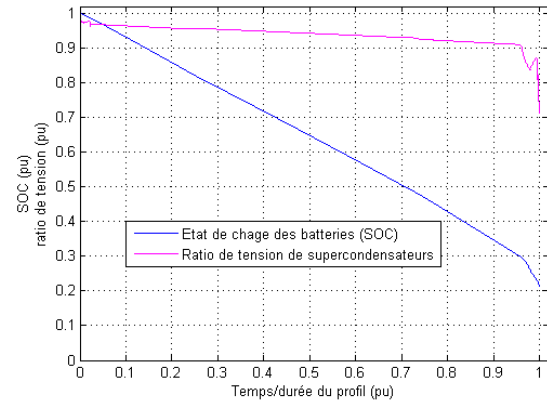


FIGURE 5.67 – Validation - Évolution de l'état de charge des batteries et du ratio de tension des supercondensateurs

Conclusion : Ce système peut être validé en appliquant un coefficient diviseur sur les résistances internes des batteries de 18. Les variations de R_0 , R_1 , C_1 et E_0 en fonction de la température et de l'état de charge, restent similaires.

La tension de bus est régulée et suffisamment stable sur l'ensemble du profil. La RMSE trouvée par rapport à 1pu est de 0,029pu. Les limites fixées par le cahier des charges et par les caractéristiques des composants sont respectées.

2.6.4/ SYSTÈME PACK DE BATTERIES AVEC CONVERTISSEUR ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS SUR LE BUS

Pour cette architecture, la liaison entre pack de batteries et charge est faite par l'intermédiaire d'un convertisseur Boost DC/DC et de sa commande. Le pack de supercondensateurs est directement connecté sur le bus DC.

Un filtre passe-bas permet de déconnecter le pack de batteries aux fréquences les plus élevées (Bloc "Energy Management Filtre passe-bas" de la Figure 5.68) et les supercondensateurs prennent le relais.

Les deux sources sont composées de batteries "Kokam 4,8Ah" et de supercondensateurs de "Batscap 650F".

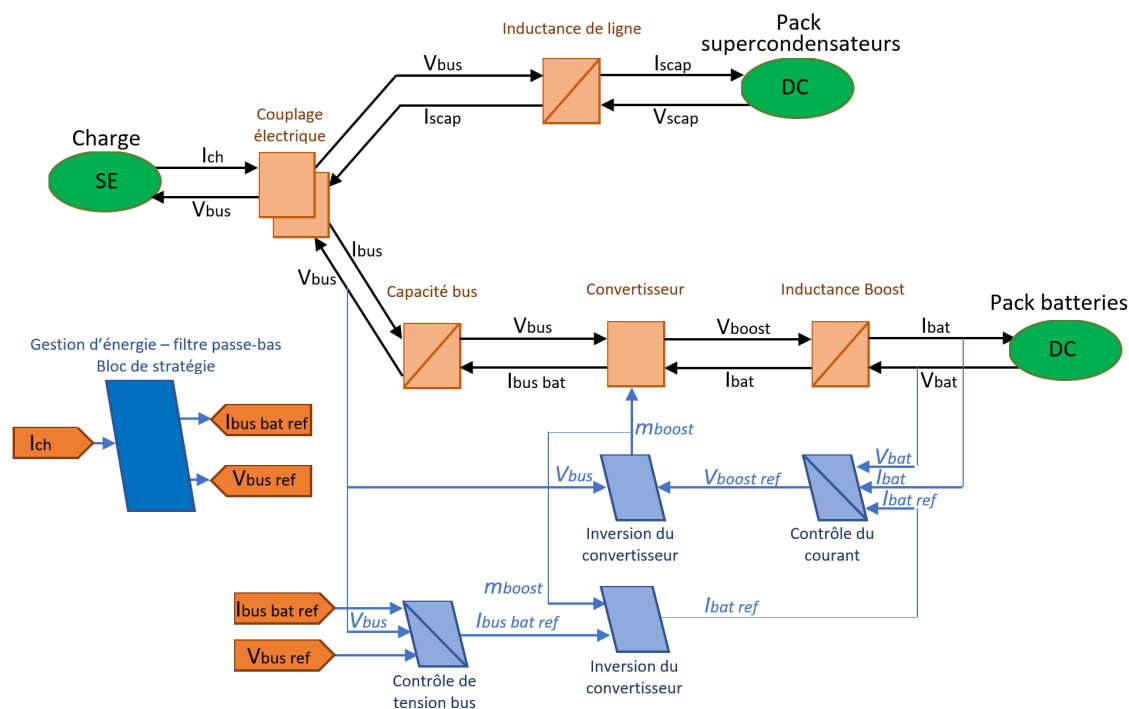


FIGURE 5.68 – Validation - Modèle REM du système

La consigne de courant demandée au pack de batteries est obtenue à l'aide d'un filtre passe-bas. Par le biais du convertisseur Boost DC/DC, le courant donné par les batteries est injecté sur le bus. La différence entre courant de charge demandé et courant venant des batteries sur le bus DC est satisfaite par le pack de supercondensateurs.

L'erreur moyenne quadratique (RMSE) entre la tension obtenue du bus et les 1pu souhaités est de 0.0041pu.

Le convertisseur Boost DC/DC permet de réguler la tension de sortie des batteries autour de la tension du bus DC de 1pu (coefficient multiplicateur). Lorsque les supercondensateurs prennent le relais, de part la puissance demandée, la tension à leurs bornes décroît ; étant directement connectés au bus DC, sa tension décroît également. En conséquence, lorsque les batteries reprennent le relais par le biais du régulateur de tension, la brusque différence entre la tension de référence et la tension réelle sur le bus DC est telle que le régulateur demande un courant important au pack de batteries en fin de profil (Figures 5.69 5.70).

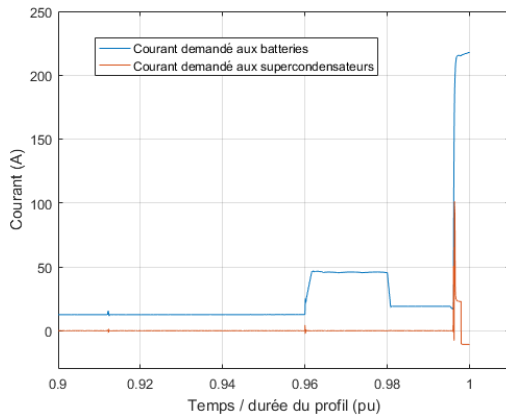


FIGURE 5.69 – Validation - Courants demandés aux batteries et aux supercondensateurs

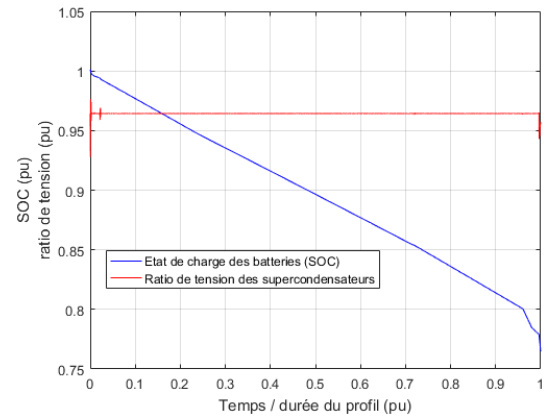


FIGURE 5.70 – Validation - Évolution de l'état de charge des batteries et du ratio de tension des supercondensateurs

Par cette forte demande de courant, il y a une détérioration de la durée de vie des batteries du pack. Il s'agit du système hybride ayant le delta de courant le plus important sur une seconde. La tension de bus peut être maintenue grâce aux supercondensateurs qui y sont connectés (Figure 5.71).

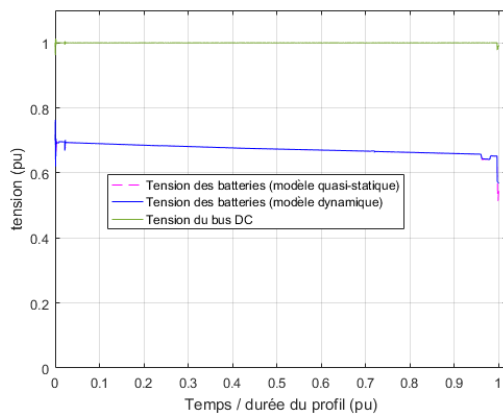


FIGURE 5.71 – Validation - Tensions en sortie des pack de batteries et de supercondensateurs

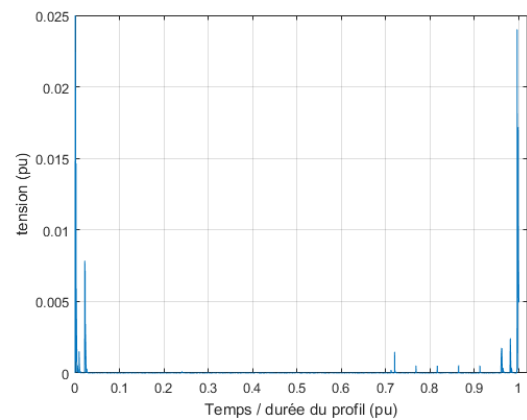


FIGURE 5.72 – Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique des batteries

Lors de l'optimisation, avec les modèles quasi-statiques, la contrainte la plus pénalisante est la valeur de tension en sortie des batteries en fin de profil ($\simeq 0,5pu$). Avec les modèles dynamiques, cette tension est supérieure à la limite fixée ($\simeq 0,57pu$) (Figure 5.72).

Le modèle quasi-statique est davantage contraignant lors de variations de courant demandé (Equation 5.4). La fréquence de coupure supérieure à 1Hz fait que le pack de batteries est soumis à plus de variations par rapport aux autres architectures hybrides. Ceci fait que le changement de modèle n'est pas négligeable.

Ainsi, les limites de températures appliquées à cette architecture peuvent être élargies. Après avoir changé les valeurs de température dans le script Matlab, la limite inférieure de 38,6°C passe à 28°C (Figures 5.73 5.74) et la limite supérieure de 52°C à la limite fixée par le cahier des charges de 55°C (Figures 5.75 5.76).

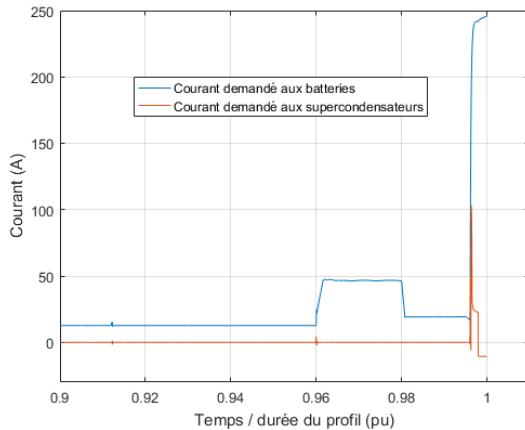


FIGURE 5.73 – Validation - Courants demandés au pack de batteries à 28°C

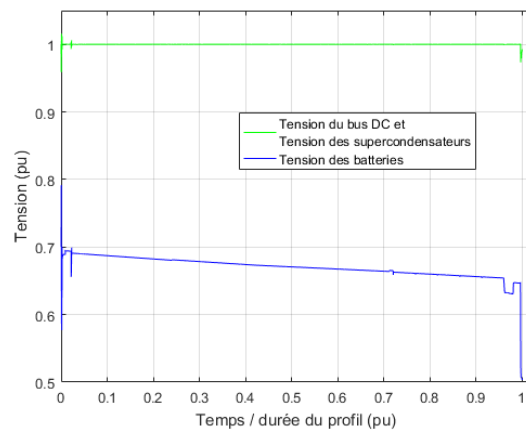


FIGURE 5.74 – Validation - Tension de sortie du pack de batteries à 28°C

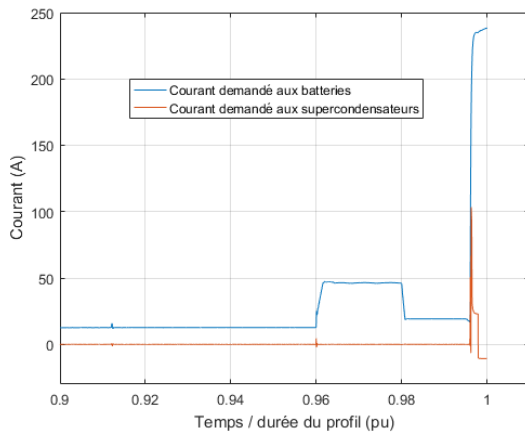


FIGURE 5.75 – Validation - Courants demandés au pack de batteries à 55°C

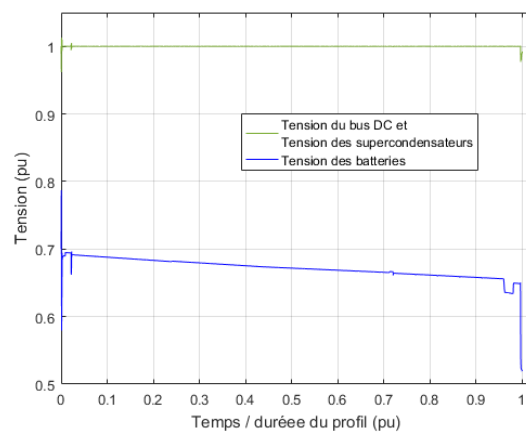


FIGURE 5.76 – Validation - Tension de sortie du pack de batteries à 55°C

Conclusion : Le fait d'un modèle dynamique moins contraignant et d'une fréquence de coupure élevée, la plage de température de fonctionnement de l'architecture a pu être élargie entre 28°C et 55°C. En-dessous de 28°C, un contrôle de la fréquence de coupure reste nécessaire.

Toutefois, il s'agit du système hybride étudié demandant la plus forte variation de courant en fin de profil au pack de batteries ; leur durée de vie s'en trouve altérée.

De plus, le pack de supercondensateurs étant directement connecté au bus DC, pour supporter sa tension, il doit être surdimensionné.

2.6.5/ SYSTÈME PACK DE BATTERIES SUR LE BUS ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS AVEC CONVERTISSEUR

Le pack de batteries fournit directement la tension sur le bus DC. Les supercondensateurs fournissent, par le biais d'un convertisseur Boost DC/DC, la réponse à une demande de puissance de la charge (Figure 5.77).

Les deux sources sont composées de batteries "Kokam 2Ah" et de supercondensateurs de "Batscap 650F".

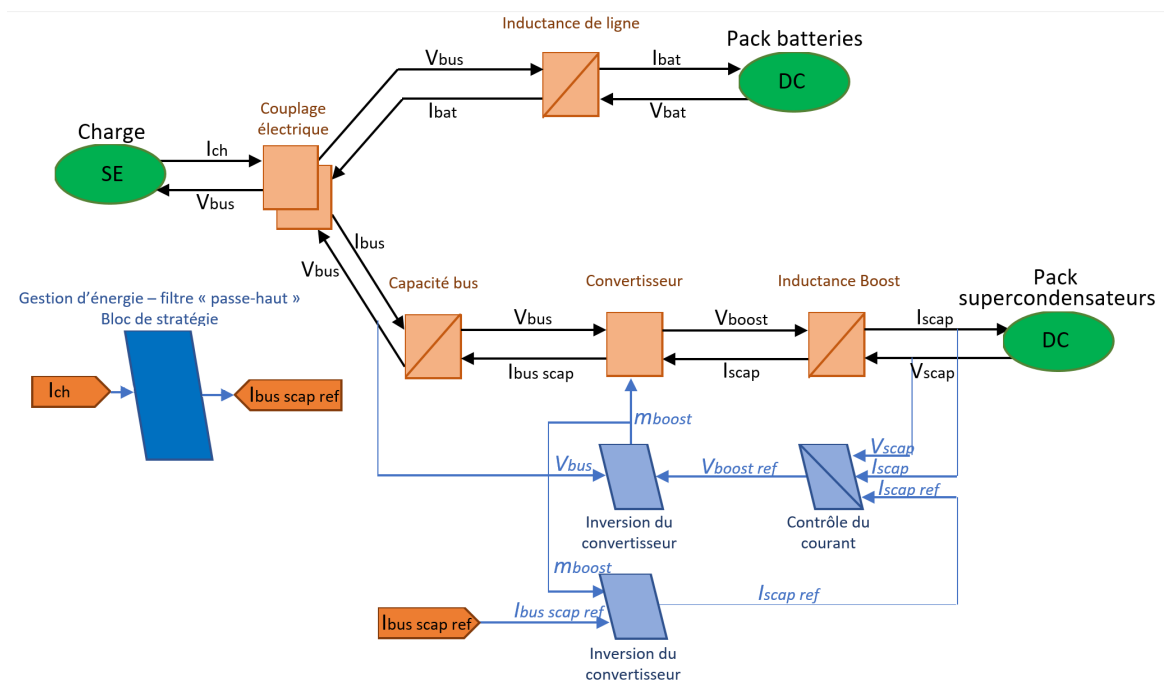


FIGURE 5.77 – Validation - Modèle REM du système

Le courant demandé au pack de supercondensateurs est obtenu à l'aide d'un filtre passe-bas dont la sortie est soustraite au courant de charge. Par le biais du convertisseur Boost DC/DC, le courant donné par les supercondensateurs est injecté sur le bus. La différence courant de charge demandé et courant venant des supercondensateurs sur le bus DC est directement demandé au pack de batteries.

Au cours du profil, les batteries se déchargeant, la tension du bus ne peut être maintenue à 1 pu. Le pack de supercondensateurs ne peut être suffisamment conséquent pour combler le manque d'énergie (Figure 5.78). Toutefois, la condition du cahier des charges de ne pas descendre sous 0,88pu est respectée. À l'utilisateur de définir si cette baisse de tension ne doit être que ponctuelle ou non.

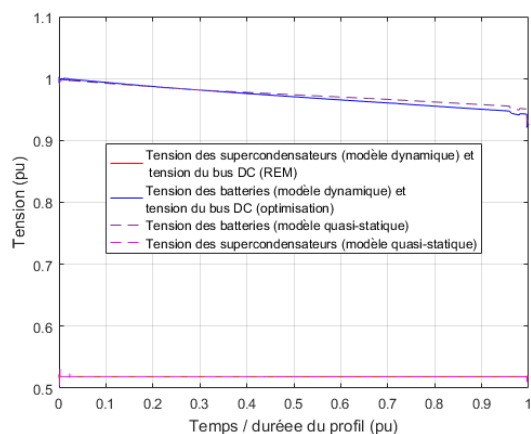


FIGURE 5.78 – Validation - Tensions en sortie des pack de batteries et de supercondensateurs

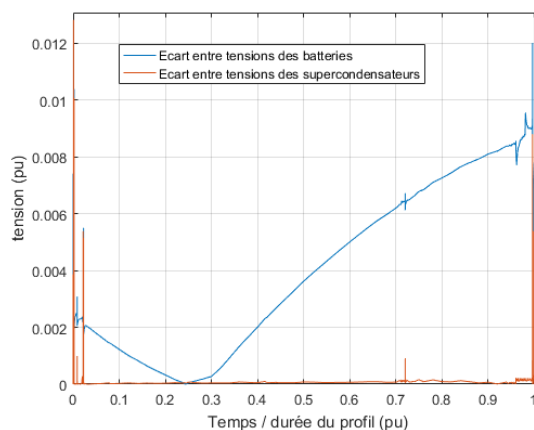


FIGURE 5.79 – Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique du schéma REM

Les supercondensateurs ne sont que peu sollicités à cause d'une fréquence de coupure élevée trouvée par l'optimisation et, en plus, représentent l'apport de masse la plus importante (Figures 5.80 5.81).

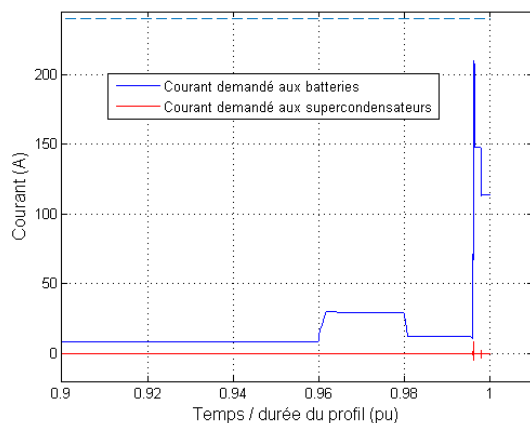


FIGURE 5.80 – Validation - Courants demandés aux batteries et aux supercondensateurs

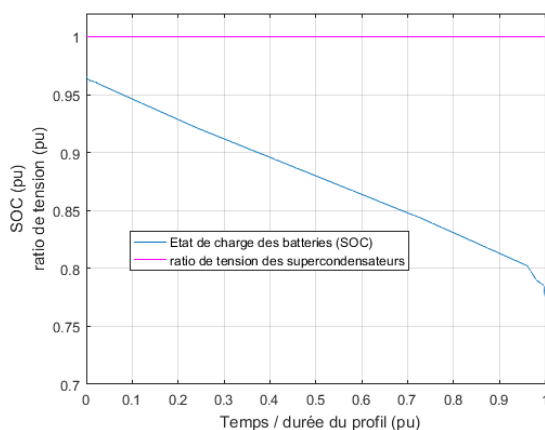


FIGURE 5.81 – Validation - Évolution de l'état de charge des batteries et du ratio de tension des supercondensateurs

Conclusion : La tension du bus DC est fonction de l'état de charge des batteries, celles-ci y étant directement reliées. Lors de l'optimisation, confirmée par la validation, la tension du bus DC peut ne pas être suffisamment stable. Toutefois, toutes les contraintes sont respectées. Pour rappel, la masse de ce système est la plus faible de tous les systèmes étudiés. Cela est dû au nombre minime de supercondensateurs constituant le pack.

2.6.6/ SYSTÈME PACK DE BATTERIES ASSOCIÉ AU PACK DE SUPERCONDENSATEURS AVEC CONVERTISSEUR

Pour cette architecture, les deux sources sont composées de batteries "Kokam 2Ah" et de supercondensateurs de "Batscap 650F". Cette fois-ci, les deux packs sont directement connectés en parallèle. Il s'en suit une faible interaction entre eux jusqu'à équilibre qui n'influence pas le fonctionnement du système.

La répartition des courants demandés par pack est fonction des caractéristiques internes des batteries et des supercondensateurs (Figure 5.82).

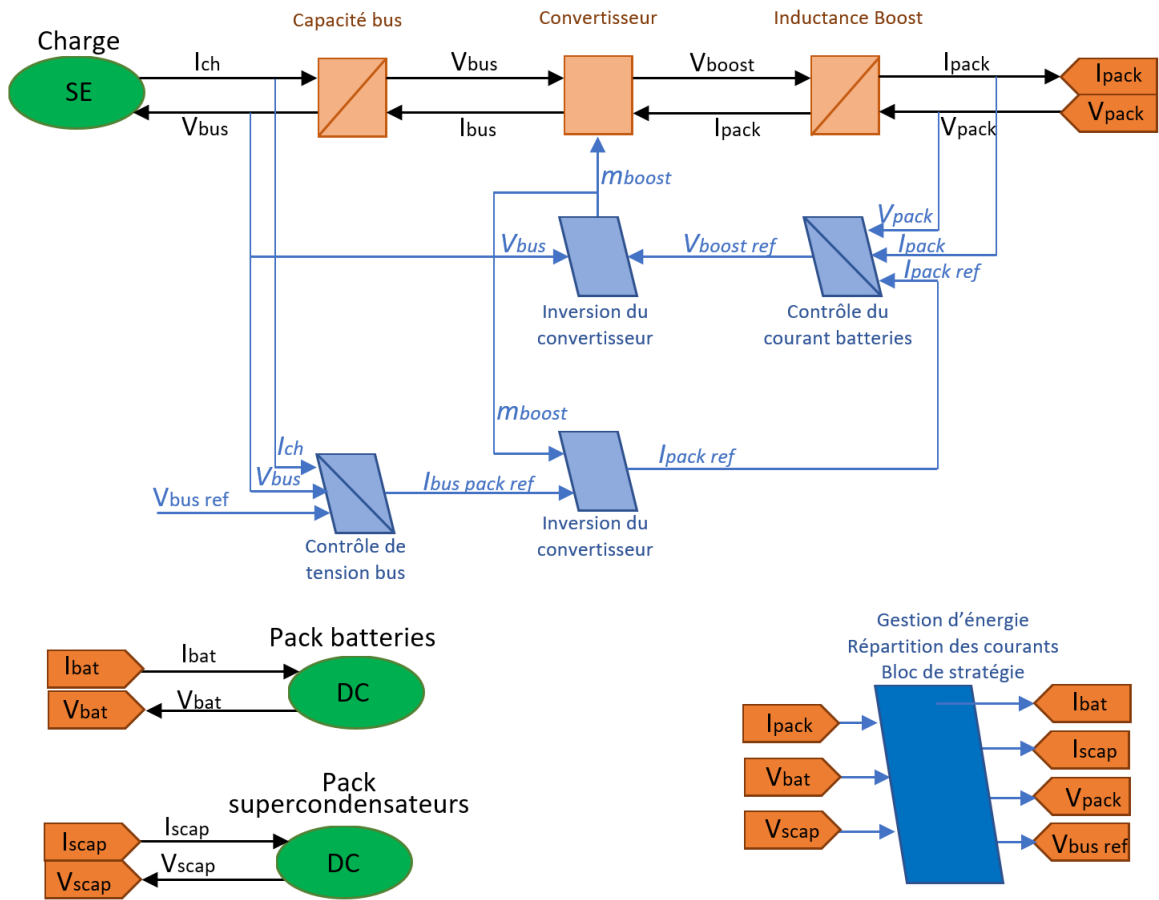


FIGURE 5.82 – Validation - Modèle REM du système

Il est possible de connaître les caractéristiques internes équivalentes par pack. Ainsi, d'après les équations 5.1 et 5.19, on a :

$$I_{pack_{bat}} = \frac{E_{0eq} - U_{pack_{bat}} - V_{R1eq}}{R_{0eq}} \quad (5.28)$$

avec $U_{pack_{sc}}$: tension en sortie de pack de batteries
 $I_{pack_{sc}}$: courant demandé au pack de batteries

$$I_{pack_{sc}} = \frac{V_{ci eq} - U_{pack_{sc}}}{R_{ieq}} + \frac{V_{rc eq} - U_{pack_{sc}}}{R_{rc eq}} \quad (5.29)$$

avec $U_{pack_{sc}}$: tension en sortie de pack de supercondensateurs
 $I_{pack_{sc}}$: courant demandé au pack de supercondensateurs

Les deux étant connectés en parallèle, les tensions $U_{pack_{bat}}$ et $U_{pack_{sc}}$ sont les mêmes et sont égales à U_{pack} . D'après les équations 5.28 et 5.29, on en déduit le courant demandé aux deux packs I_{pack} , puis la tension de sortie :

$$\begin{aligned}
 I_{pack} &= I_{pack_{bat}} + I_{pack_{sc}} \\
 \Rightarrow I_{pack} &= \left(\frac{E_{0eq} - U_{pack} - V_{R1eq}}{R_{0eq}} \right) + \left(\frac{V_{cieq} - U_{pack}}{R_{ieq}} + \frac{V_{crc eq} - U_{pack}}{R_{rc eq}} \right) \\
 \Rightarrow U_{pack} &= \frac{\frac{E_{0eq} - V_{R1eq}}{R_{0eq}} + \frac{V_{cieq}}{R_{ieq}} + \frac{V_{crc eq}}{R_{rc eq}} - I_{pack}}{\frac{1}{R_{0eq}} + \frac{1}{R_{ieq}} + \frac{1}{R_{rc eq}}} \quad (5.30)
 \end{aligned}$$

De cette dernière équation 5.30, il est possible de déterminer les courants demandés au deux packs (Équations 5.28 et 5.29). L'ensemble est écrit dans un bloc "Matlab function" du schéma REM ("Energy Management Strategy block")(Figure 5.83).

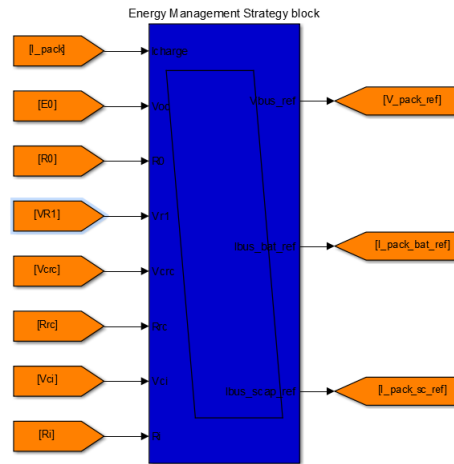


FIGURE 5.83 – Validation - Répartition des courants programmée dans le bloc gestion d'énergie

De la sorte, l'écart entre tensions de sortie trouvées lors de l'optimisation et lors de la validation est très faible (écart maximum $\simeq 0.005pu$)(Figure 5.85).

L'erreur moyenne quadratique entre la tension du bus et sa valeur nominale de 1pu est de 0.022pu.

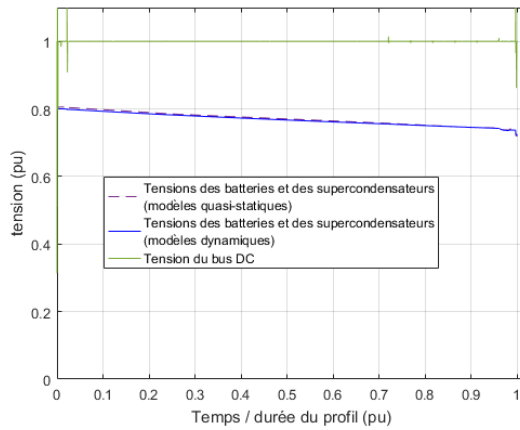


FIGURE 5.84 – Validation - Tensions en sortie des pack de batteries et de supercondensateurs

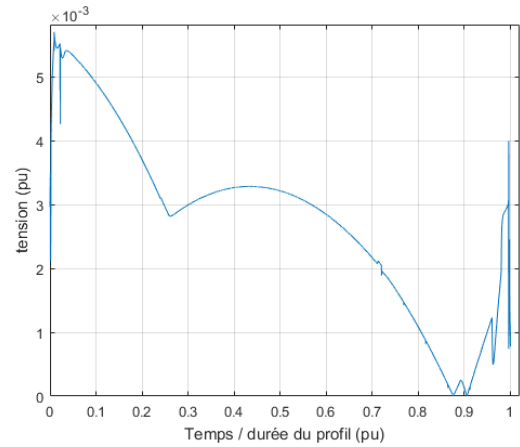


FIGURE 5.85 – Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique du schéma REM

Ce système hybride ne permet aucun contrôle sur la répartition des charges entre sources. Les interactions entre packs sont fonction des caractéristiques internes des cellules des packs. Cette interaction est accentuée en fin de profil lors du pic de demande de courant ; la tension aux bornes des supercondensateurs ayant tendance à décroître davantage. Ainsi, le courant délivré par les batteries peut devenir important. La valeur de courant maximum ($I_{max} = 150A$) est dépassée (Figure 5.86).

La durée du dépassement est inférieure à un dixième de seconde. La valeur maximale de courant pouvant être donnée pendant une seconde ($I_{pulse} = 60A$, par branche du pack) n'est jamais atteinte.

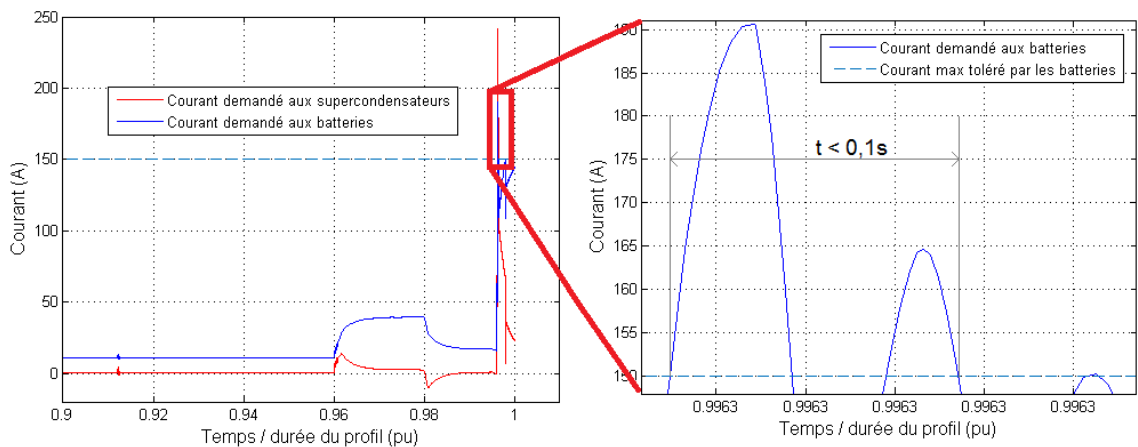


FIGURE 5.86 – Validation - Courants demandés aux batteries et aux supercondensateurs

L'état de charge minimum pour la batterie est de 0,1. Le ratio de tension du supercondensateur minimum de 0,5. En fin de profil, ces deux contraintes sont respectées (Figure 5.87).

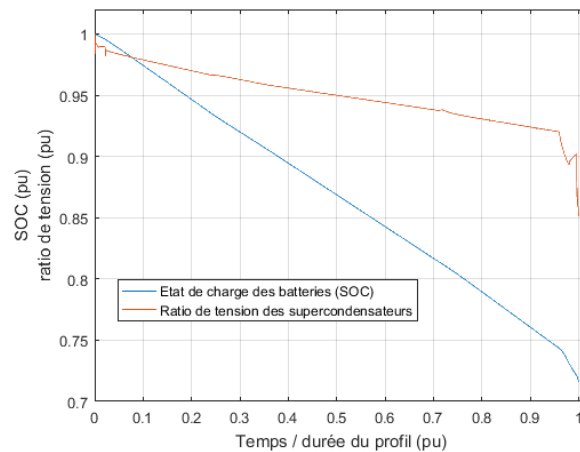


FIGURE 5.87 – Validation - Évolution de l'état de charge des batteries et du ratio de tension des supercondensateurs

Conclusion : La tension de bus est régulée et suffisamment stable sur l'ensemble du profil. La RMSE trouvée par rapport à 1pu est de 0,022pu.

Les limites fixées par le cahier des charges et par les caractéristiques des composants sont respectées. Il s'agit du seul système hybride où aucun contrôle, pour répartir les demandes de courant vers tel ou tel pack, n'est possible.

3/ SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS APRÈS OPTIMISATION ET VALIDATION

Une synthèse des résultats obtenus par architecture est proposée sous forme de graphiques "toile d'araignée" regroupant les différents critères nécessaires pour avoir une bonne représentation du système.

Les valeurs associées aux différents critères représentent une note entre 0 et 5 (5 étant la meilleure possible). Ainsi, on cherche à limiter : la masse, le nombre de cellules à embarquer et l'influence de la température. Dans ces cas, respectivement, plus la masse est faible, moins le nombre de cellules est important et moins la température ambiante influe sur le bon fonctionnement, meilleure sera la note.

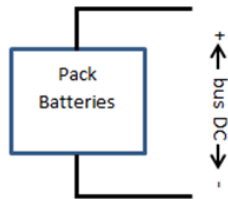
Le critère "qualité de la tension bus" est trouvé en calculant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre la tension simulée du bus et la tension souhaitée sur le bus (1pu).

Le rapport "énergie utilisée sur énergie stockée" et le ratio de tension nous indiquent le taux d'utilisation respectivement des batteries, des supercondensateurs.

Le critère de "puissance max (BAT)" indique la puissance maximale que peut délivrer le pack de batteries en comparaison des packs de batteries des autres architectures. Idem pour les supercondensateurs.

Ces résultats sont repris de la simulation par Représentation Énergétique Macroscopique (REM) avec modèles dynamiques sous Matlab-Simulink.

3.1/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES SEUL



Avantages :

- masse du système faible

Inconvénients :

- nombre de cellules important
- sensible à la température
- qualité de tension de bus moindre
- énergie stockée sous-utilisée

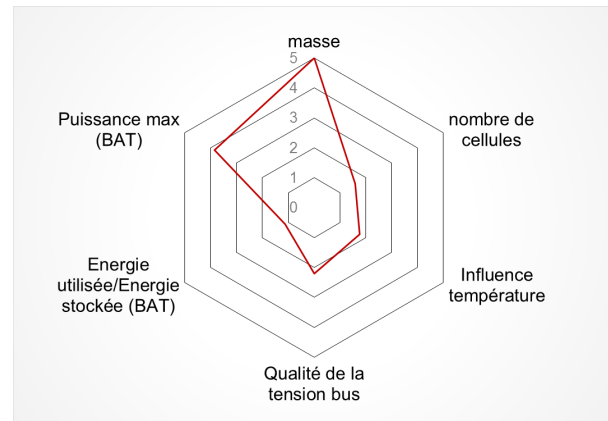
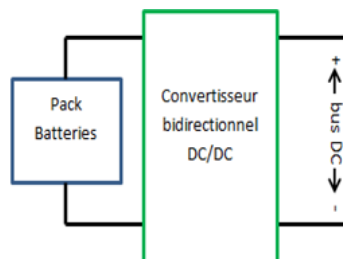


FIGURE 5.88 – Propriétés de l'architecture "Pack de batteries seul".

3.2/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES AVEC UN CONVERTISSEUR



Avantages :

- masse du système faible
- nombre de cellules

Inconvénients :

- sensible à la température
- qualité de tension de bus moindre
- énergie stockée sous-utilisée

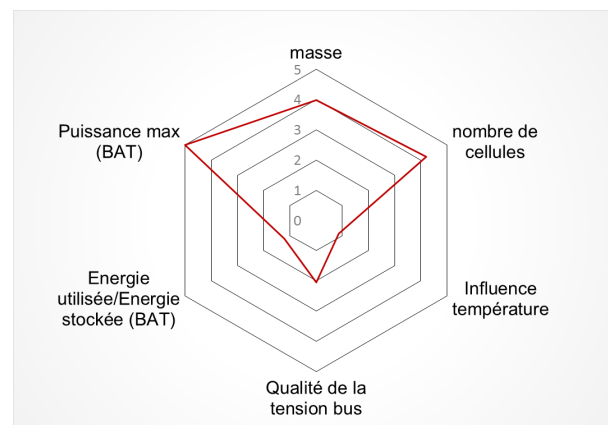
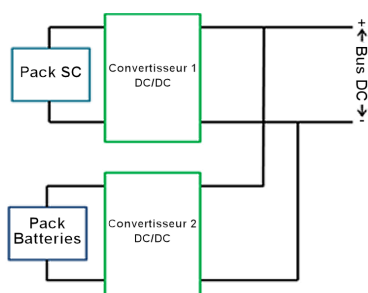


FIGURE 5.89 – Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".

3.3/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES AVEC UN CONVERTISSEUR ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS AVEC UN CONVERTISSEUR



Avantages :

- qualité de tension de bus
- influence de la température moindre
- utilisation des composants optimum

Inconvénients :

- masse plus importante

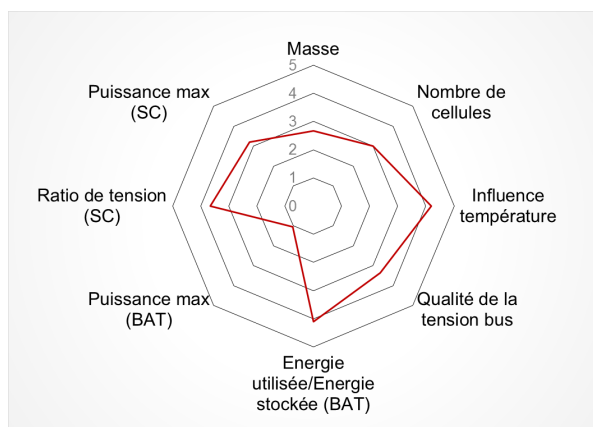
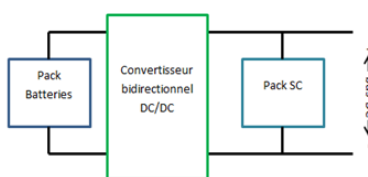


FIGURE 5.90 – Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".

3.4/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES AVEC UN CONVERTISSEUR ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS SUR LE BUS DC



Avantages :

- qualité de tension de bus

Inconvénients :

- masse du système importante
- sensible à la température
- Composants de stockage sous-utilisés

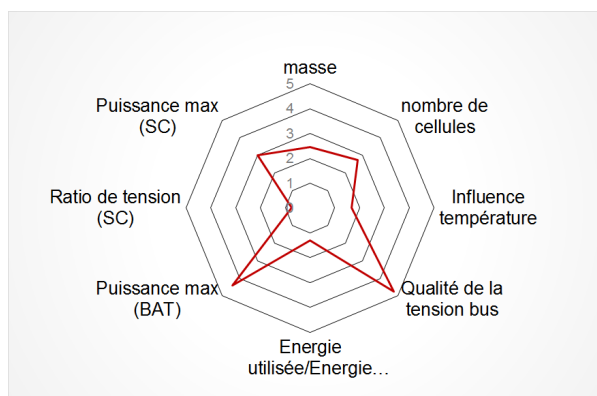
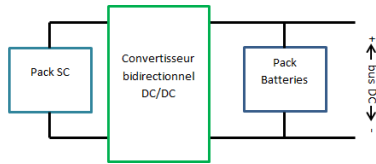


FIGURE 5.91 – Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".

3.5/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES SUR LE BUS DC ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS AVEC UN CONVERTISSEUR



Avantages :

- masse du système faible

Inconvénients :

- nombre de cellules important
- sensible à la température
- qualité de tension de bus moindre
- Composants de stockage sous-utilisés

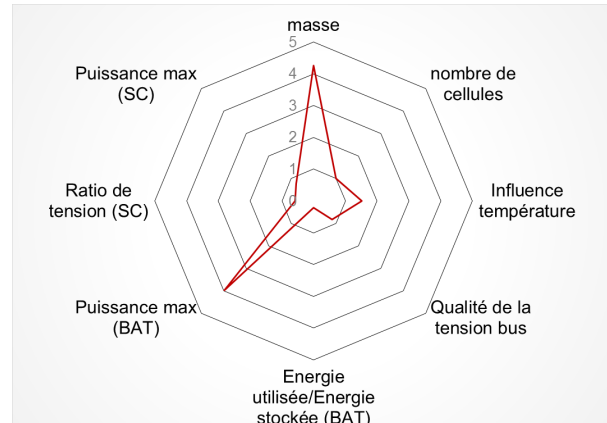
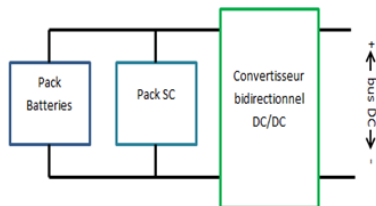


FIGURE 5.92 – Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".

3.6/ ARCHITECTURE PACK DE BATTERIES ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS CONNECTÉS À UN CONVERTISSEUR



Avantages :

- Influence de la température moindre
- qualité de tension de bus

Inconvénients :

- masse du système importante
- nombre de cellules important
- énergie stockée sous-utilisée

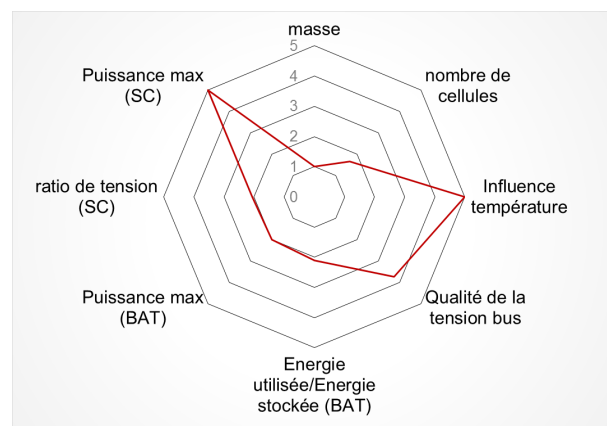


FIGURE 5.93 – Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".

4/ CONCLUSION SUR L'ANALYSE ET VÉRIFICATION DU DIMENSIONNEMENT PAR ARCHITECTURE

Par soucis de temps d'exécution du programme d'optimisation de la masse, le schéma Simulink de l'architecture en question est simplifié (par exemple le convertisseur DC/DC est remplacé par un coefficient multiplicateur variable) et les modèles quasi-statiques des cellules des packs sont utilisés.

Toutes les cellules du pack sont parfaitement identiques : les tolérances énoncées par les constructeurs sur les valeurs de capacité et de résistances internes, ignorées. Seuls l'état de charge et la température ambiante font varier ces valeurs.

Dans ce dernier chapitre, les résultats par optimisation sont exploités, les caractéristiques des différents systèmes étudiées et la contrainte la plus pénalisante identifiée.

Pour valider les caractéristiques de pack trouvées par optimisation, les schémas "simplifiés" de l'architecture sont traduits sous forme de Représentation Énergétique Macroscopique (REM). Des modèles dynamiques des cellules de pack remplacent les modèles quasi-statiques et les incertitudes "constructeurs" sur les valeurs de composants sont utilisées aléatoirement individuellement.

Le/les convertisseurs Boost DC/DC sont implantés. Leur fonctionnement prend en compte les différentes pertes de puissance dues à la présence d'inductances et de composants d'électronique de puissance.

La tension de bus est régulée par deux correcteurs IP (sauf pour l'architecture "pack de batteries seul") en tension pour la boucle externe et en courant pour la boucle interne. Ce contrôle permet de définir le courant à demander au pack de batteries et/ou au pack de supercondensateurs en fonction de l'architecture étudiée.

Ainsi, il est possible de s'approcher précisément du fonctionnement réel du système.

Les caractéristiques du modèle dynamique de la batterie "Kokam 2Ah" trouvées par l'optimisation n'étaient pas disponible. Une identification par expérimentation a été nécessaire.

Malgré des petites différences sur les valeurs de tension, de courant... entre les modèles quasi-statiques et dynamiques, il a été possible de valider les différents systèmes. Le modèle dynamique de batteries est moins contraignant que le modèle quasi-statique lors de variation du courant demandé. De ce fait, la plage de température utilisable de l'architecture hybride "Pack de batteries connecté à un convertisseur DC/DC et pack de supercondensateurs sur le bus" est élargie.

Après une synthèse des différents fonctionnements des systèmes trouvés par optimisation, il appartient à l'utilisateur d'établir une priorité sur les différents critères souhaités, pour faire son choix.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Depuis quelques années, la consommation en énergie électrique dans les aéronefs est plus importante car les systèmes auxiliaires sont plus nombreux. L'évolution de ces transports s'oriente vers le "plus électrique".

De plus, les progrès réalisés en électronique de puissance et sur le stockage embarqué de l'énergie électrique ouvrent des perspectives permettant, non seulement, de répondre aux nouvelles exigences, mais également, de remplacer progressivement les autres types de sources d'énergie. Ces avancées induisent une meilleure fiabilité du système en s'orientant vers un unique type d'énergie entraînant une réduction de la masse, donc une réduction des émissions de gaz à effet de serre et/ou un gain de masse supplémentaire pouvant être embarquée.

Dans le premier chapitre, un état de l'art sur le stockage de l'énergie électrique à bord des aéronefs est proposé. Il permet un comparatif des différents moyens de stockage envisageables. Cette comparaison met en évidence la nécessité d'une hybridation répondant aux différents types de demande des appareils auxiliaires (puissance et énergie).

Ainsi, la complémentarité constatée sur le diagramme de Ragone exprimant les capacités énergétiques et la puissance possible à fournir pour chaque élément, nous amène à envisager une association de batteries lithium-ion et de supercondensateurs.

L'objectif principal de ce travail est de minimiser la masse de ce système tout en respectant les critères primordiaux. Ces derniers sont la gestion d'énergie permettant de répondre aux demandes des systèmes auxiliaires et la définition des caractéristiques choisies du bus pour une répartition fiable de la puissance sur l'ensemble de l'aéronef.

De récentes études montrent un intérêt pour des systèmes à bus à tension continue. Ceux-ci permettent une plus grande fiabilité, une meilleure qualité d'alimentation, des frais d'entretien et de réparation moindres ainsi qu'une simplification des méthodes de récupération d'énergie. Un bus DC est considéré pour notre système.

Un premier modèle de batteries et un autre de supercondensateurs sont proposés (modèles quasi-statiques). Leurs caractéristiques évoluent en fonction de la température ambiante. L'association en série et en parallèle de chacun d'eux représente une première étape en vue d'identifier les caractéristiques des deux packs lors de la phase d'optimisation.

Des modèles plus précis des deux composants (modèles dynamiques) servent à la validation des systèmes hybrides trouvés. Leur association en série et en parallèle est également décrite.

Le second chapitre commence par un état de l'art des systèmes hybrides électriques, afin de déterminer les différentes associations possibles entre les deux packs de composants. Il s'avère que trois types d'architecture sont cités dans la littérature : la première, une association directe entre packs couplées à un convertisseur DC/DC ; la deuxième, un pack couplé à

un convertisseur DC/DC l'autre sur le bus DC ; la dernière, chacun des packs couplé à un convertisseur DC/DC. Le choix des architectures à étudier représente la seconde étape nécessaire à la modélisation de notre système.

Le fait d'ajouter un convertisseur DC/DC en sortie de pack permet de diminuer son nombre de cellules. Ce gain du nombre de cellules, donc de masse, dans le pack ne compense pas l'apport de masse dû au convertisseur. En revanche, la contribution en puissance et en énergie des composants du pack est plus conséquente. La qualité de tension du bus s'en trouve améliorée. Quelle que soit la gestion d'énergie choisie, la répartition des puissances demandées peut être ramenée à une approche fréquentielle. C'est pourquoi, dans notre cas, celle-ci reste simple. La répartition de puissances demandées aux différents packs se fait par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas. La fréquence de coupure de ce filtre représente la seule caractéristique du système final pouvant être contrôlée. La demande en puissance sollicite le pack de supercondensateurs (fréquences supérieures à la fréquence de coupure du filtre) et la demande en énergie, le pack de batteries (fréquences inférieures à la fréquence de coupure).

Dans le troisième chapitre, nous définissons le critère à optimiser (fonction objectif), ici, en l'occurrence, la masse du système, en fonction de l'architecture électrique choisie, et les contraintes à satisfaire.

La valeur de cette masse est fonction de la masse unitaire d'une cellule de pack et du nombre de composants en série, en parallèle. Ces quantités dépendent de critères qui sont la fréquence de coupure du filtre passe-bas, la profondeur de décharge des batteries, le ratio de tension des supercondensateurs, la température ambiante et le profil de mission demandé. Ce dernier a été choisi en fonction de l'énergie et de la puissance qui seront demandées aux packs. Le profil de la phase de démarrage, hors parking, est le plus contraignant en quantité d'énergie demandée et en puissance maximale à supporter.

L'ensemble de ces variables d'optimisation doit respecter des contraintes électriques.

L'énergie nécessaire au bon déroulement du profil de mission et la fréquence de coupure permettent de déterminer la quantité minimale de cellules nécessaires dans le pack. La tension maximale que doit supporter le pack nous indique le nombre maximum de cellules en série. De ces deux valeurs est déduit le nombre minimum de branches en parallèle.

De ces trois contraintes "a priori" est déterminé un ensemble de différentes configurations possibles de packs.

Après simulation, le pack privilégié est celui disposant du plus petit nombre de cellules respectant les contraintes électriques "a posteriori". À savoir : la tension de sortie en fin de profil est supérieure au minimum acceptable, le courant maximum demandé est toléré et la puissance délivrée est supportée par le convertisseur DC/DC couplé en sortie de pack.

Le problème d'optimisation formulé est, soit résolu avec une méthode de recuit simulé, lorsqu'il manipule des variables continues, soit avec un algorithme génétique lorsque les variables discrètes entrent en jeu.

En dernier lieu, les résultats par architecture sont détaillés, permettant ainsi de mettre en évidence la contrainte la plus pénalisante du système.

La validation de nos systèmes est réalisée à l'aide d'une Représentation Énergétique Macroscopique (REM) basée sur le transfert de l'énergie. Un schéma REM est conçu pour

chacune des architectures électriques. Les sources de stockage d'énergie de la REM sont initialisées grâce aux valeurs des caractéristiques des packs trouvées lors de l'optimisation (nombres en série, en parallèle et type de cellule). Les cellules de ces sources sont caractérisées par leur modèle dynamique et par des paramètres uniques fonction des tolérances constructeurs.

Il ressort que chaque architecture dispose d'avantages et d'inconvénients qui leurs sont spécifiques. Ainsi, un gain de masse conséquent ne peut se faire qu'au détriment de la qualité de la tension et d'une sensibilité accrue à la température ambiante.

L'architecture "pack de batteries couplé à un convertisseur et pack de supercondensateurs couplé à un autre convertisseur" apparaît comme étant un bon compromis entre les différents critères de masse, de fiabilité, de qualité de tension de bus, de nombre de cellules dans les packs et d'influence de la température sur le bon fonctionnement.

Au cours de ce travail, une série de perspectives, très certainement non exhaustive, a pu être établie. Ces nouveaux travaux peuvent être répartis en deux différents objectifs : à court terme, l'étude des systèmes définis dans ce manuscrit en fonctionnement altéré et, à moyen terme, réduire davantage l'apport de masse par rapport aux caractéristiques trouvées.

L'étude des systèmes en mode altéré peut être effectuée :

- en transférant le schéma REM représentant une architecture électrique vers un environnement dSpace en vue d'émuler son fonctionnement. Les caractéristiques de l'architecture sont dorénavant connues.
- en établissant une série de dysfonctionnement possible d'une cellule d'un pack, d'un pack et d'un convertisseur.
- durant l'émulation, en modifiant la valeur ou la fonction du paramètre permettant de simuler le défaut ; par exemple, en augmentant de manière exagérée la valeur de la variable représentant la température d'une batterie.

Ainsi, il est possible de connaître la réaction du système. Mais, surtout, d'essayer de remédier au dysfonctionnement en agissant sur le seul paramètre contrôlable : la fréquence de coupure.

Il est envisageable de réduire encore les masses des systèmes trouvés lors de ce travail :

- Une étude de la variation de la température en différents endroits du pack de batteries est à faire. Au cours du profil en fonction de la puissance demandée, mais également en fonction de la position de la cellule dans le pack, la température augmente différemment.
Si, au départ, la température des batteries peut être basse (jusqu'à -25°C), durant le profil, celle-ci va augmenter suite aux sollicitations et améliorer le rendement du pack. Une nouvelle optimisation du système, à température variable, peut permettre de réduire la taille des packs ; par conséquent leur masse.
- En phase de démarrage, l'intégralité de l'énergie électrique stockée est nécessaire lorsque l'hélicoptère est au sol, moteurs éteints, hors parking et à une température

de -25°C . Autant dire que cette situation est exceptionnelle. Toute cette énergie électrique embarquée n'est pas nécessaire durant les phases de vol.

Sachant que les normes aéronautiques imposent un dédoublement des systèmes ainsi que leur ségrégation, peut-il être envisagé de réduire le nombre de branches de composants dans les packs, sans perdre de vue qu'il faut toujours satisfaire aux conditions générales et imaginer pouvoir connecter une ou plusieurs branches de cellules venant du pack "de secours" dans les rares cas où l'hélicoptère se trouveraient dans la situation indiquée ci-dessus (pour rappel, l'appareil n'est pas en vol dans cette situation) ?

Ce qui nous permettrait d'être dans les normes en vol tout en diminuant la masse des packs.

Dans cette éventualité, une étude est à envisager permettant une interaction entre systèmes dédoublés lorsque l'appareil se retrouve dans les conditions exceptionnelles citées.

Et devrait suivre une nouvelle optimisation impliquant, non plus la phase de démarrage (profil de puissance le plus contraignant), mais le/les profils les plus contraignants en demande de puissance et d'énergie en vol.

Le nombre de branches nécessaires par pack, obtenus par notre optimisation (phase de démarrage), serait alors réparti entre nouveau système "principal" et système "de secours".

À plus long terme et toujours dans l'optique d'une réduction de masse, de nouvelles technologies de composants d'électronique de puissance et de composants de stockage voient le jour.

- Les premiers composants d'électronique de puissance de technologie SiC commencent à être commercialisés. Ceux-ci ne nécessitent qu'un système de refroidissement passif et ont des pertes moindres par rapport à leurs prédécesseurs. Ces nouvelles caractéristiques peuvent représenter un gain de masse pour le système de régulation de la température et pour le dispositif de stockage de l'énergie.
- À moyen terme, les supercondensateurs au graphène seront commercialisés. Ils disposent d'une énergie massique plus importante que les actuels supercondensateurs. Le nombre de cellules du pack sera moindre. Mais également, ces derniers pourront prendre en charge une partie de l'énergie actuellement distribuée par les batteries. Une diminution conséquente de la masse des packs est alors à envisager.
Ce dernier point demande à revoir la base de données disponible des supercondensateurs à partir duquel notre dimensionnement a été réalisé.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N.METROPOLIS, A.ROSENBLUTH, M.ROSENBLUTH, A.TELLER, AND E.TELLER. **Equation of state calculations by fast computing machines.** *Journal of Chemical Physics*, vol. 21, pp. 1087-1092 (1953).
- [2] S.KIRKPATRICK, C.D.GELATT, AND M.P.VECCHI. **Optimization by simulated annealing.** *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680 (1983).
- [3] M.J.CRONIN. **All electric environmental control system for advanced transport aircraft.** *U.S. Patent 4,523,517* (1985).
- [4] V.ČERNÝ. **Thermodynamical approach to the traveling salesman problem : An efficient simulation algorithm.** *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 45, Issue 1, pp 41–51 (1985).
- [5] B.HAJEK. **A tutorial survey of theory and applications of simulated annealing.** *Decision and Control, 24th IEEE Conference on* (1985, Added to IEEE Xplore 2007).
- [6] D.GOLDBERG. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.** Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [7] R.RUTENBAR. **Simulated annealing algorithms : An overview.** *IEEE Circuits and Devices Magazine* (1989, Added to IEEE Xplore 2002).
- [8] J.A.WEIMER. **Electrical power technology for more electric aircraft.** *IEEE Digital Avionics Systems Conference* (1993).
- [9] W.G.HOMEYER, E.E.BOWELS, S.P.LUPAN, C.RODRIGUEZ, AND PP.S.WALIA. **Advanced power converters for more electric aircraft applications.** *IEEE Energy Conversion Engineering Conference* (1997).
- [10] K.W.E.CHENG. **Comparative study of ac/dc converters for more electric aircraft.** *IEEE Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives* (1998).
- [11] M.A.MALDONADO, N.M.SHAH, K.J.CLEEK, AND G.J.KORBA. **Power management and distribution system for a more electric aircraft.** *IEEE AES Systems Magazine* (1999).
- [12] M.OLAITA, AND N.BUCHAN. **High power variable frequency generator for large civil aircraft.** *IET Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft* (1999).
- [13] A.EMADI, AND M.EHSANI. **Aircraft power systems : technology, state of art, and future trends.** *IEEE AES Systems Magazine* (2000).
- [14] L.ZUBIETA, AND R.BONERT. **Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications.** *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.36, pp.199-205 (2000).
- [15] J.P.ZHENG, T.R.JOW, AND M.S.DING. **Hybrid power sources for pulsed current applications.** *Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (2001).
- [16] K.DESCHINKEL. **Régulation du trafic aérien par optimisation dynamique des prix d'utilisation du réseau.** PhD thesis, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2001.

- [17] G.-J.SU, F.Z.PENG, AND J.ADAMS. **Expereimental evaluation of a soft-switching dc/dc converter for fuel cell vehicle applications.** *Power Electronics in Transportation*, pp.39-44 (2002).
- [18] H.MATSUO, WENZHONG, L., F.KUROKAWA, T.SHIGEMIZU, AND N.WATANABE. **Characteristics of the multiple input dc-dc converter.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, Issue 3, pp. 625-631 (2004).
- [19] M.H.TODOROVIC, L.PALMA, AND P.N.ENJETI. **Design of a wide input range dc-dc converter with a robust power control scheme suitable for fuel cell power conversion.** *Applied Power Electronics Conference and Expo* (2004).
- [20] O.LANGLOIS, E.FOCH, X.ROBOAM, AND H.PIQUET. **De l'avion plus électrique à l'avion tout électrique : Etat de l'art et prospective sur les réseaux de bords.** *Journée électrotechnique du club EEA, Cergy-Pontoise* (2004).
- [21] B.H.LEE, D.H.SHIN, B.W.KIM, H.J.KIM, B.K.LEE, C.Y.WON, AND J.HUR. **A study on hybrid energy storage system for 42v automotive power-net.** *Vehicle Power and Propulsion Conference* (2006).
- [22] E.KUHN, C.FORGEZ, P.LAGONOTTE, AND G.FRIEDRI. **Modelling ni-mh battery using cauer and foster structures.** *Journal of Power Sources*, vol.158, pp.1490-149 (2006).
- [23] F.KRISMER, S.ROUND, AND KOLAR, J. **Performance optimization of a high current dual active bridge with a wide operating voltage range.** *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)* (2006).
- [24] J.HALE. **Boeing 787 from the ground up.** *Boeing Aero Magazine*, pp. 17-23 (2006).
- [25] MAXWELL. **Gateway to a new thinking in energy management - ultra capacitors.**
- [26] S.LEMOFOUET, AND A.RUFER. **A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency tracking.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, Issue 4, pp. 1105-1115 (2006).
- [27] Z.JIANG, AND R.A.DOUGAL. **A compact digitally controlled fuel cell/battery hybrid power source.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, Issue 4, pp. 1094-1104 (2006).
- [28] L.SHUAI, K.A.CORZINE, AND M.FERDOWSI. **A new battery/ultra capacitor energy storage system design and its lotor drive integration for hybrid electric vehicles.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, Issue 4, pp. 1516-1523 (2007).
- [29] M.ORTUZAR, J.MORENO, AND J.DIXON. **Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle : Implementation and evaluation.** *Applied Power Electronics Conference and Expo* (2007).
- [30] P.THOUNTHONG, S.RAËL, AND B.DAVA. **Control strategy of fuel cell and super-capacitors association for a distributed generation system.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.54, pp.3225-3233 (2007).
- [31] A.TEO, K.RAJASHEKARA, J.HILL, AND B.SIMMERS. **Examination of aircraft electric wheel drive taxiing concept.** *SAE Power Systems Conference* (2008).
- [32] C.AKLI. **Conception systémique d'une locomotive hybride autonome.** PhD thesis, Universté de Toulouse, 2008.
- [33] H.IBRAHIM, A.ILINCA, AND J.PERRON. **Energy storage systems - characteristics and comparisons.** *Renewable and sustainable energy reviews*, vol.12, pp.1221-1250 (2008).

- [34] H.YOO, S.K.SUL, Y.PARK, AND J.JEONG. **System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries.** *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, Issue 1, pp. 108-114 (2008).
- [35] L.BOULON, D.HISSEL, A.BOUSCAYROL, M.PÉRA, AND 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* (2008).
- [36] M.CAMARA, H.GUALOUS, F.GUSTIN, AND A.BERTHON. **Design and control of a dc/dc converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, Issue 5, pp. 2721-2735 (2008).
- [37] M.CAMARA, H.GUALOUS, F.GUSTIN, AND 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.2721-273 (2008).
- [38] P.HALL, AND E.BAIN. **Energy storage technologies and electricity generation.** *Energy Policy*, vol.36, pp. 4352-4355 (2008).
- [39] T.HAIMIN, J.L.DUARTE, AND M.A.M.HENDRIX. **Multiport converters for hybrid power sources.** *Power Electronics Specialists Conference* (2008).
- [40] W.HENSON. **Optimal battery/ultracapacitor storage combination.** *Journal of Power Sources*, vol. 179, Issue 1, pp. 417-423 (2008).
- [41] CONSORSIUM, M. **More open electrical technologie.** *Technical report, MOET-0.02-AF-DEL-PublicReport-0001-09-R1.0», 11 décembre* (2009).
- [42] F.BAALBERGEN, P.BAUER, AND J.FERREIRA. **Energy storage and power management for typical 4q-load.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.56, pp.1485-149 (2009).
- [43] I.ARSIE, G.RIZZO, AND M.SORRENTINO. **Genetic algorithms based optimization of intermittent ice scheduling on a hybrid solar vehicle.** *Control Conference (ECC)* (2009).
- [44] M.BILBAO, AND E.ALBA. **Simulated annealing for optimization of wind farm annual profit.** *2nd International Symposium on Logistics and Industrial Informatics* (2009).
- [45] M.DUBARRY, N.VUILLAUME, AND B.Y.LIAW. **From single cell model to battery pack simulation for li-ion batteries.** *Journal of Power Sources*, vol.186, pp.500-507 (2009).
- [46] RASTLER, D. **Program manager - electric power research institute.** *Electric Power Research Institute* (2009).
- [47] A.EID, H.EL-KISHKY, M.ABDEL-SALAM, AND T.EL-MOHANDES. **Modeling and characterization of an aircraft electric power system with a fuel cell-equipped apu paralleled at main ac bus.** *IEEE Conference on International Power Modulator and High Voltage* (2010).
- [48] A.R.BEHBAHANI, AND K.J.SEMEGA. **Control strategy for electromechanical actuators versus hydraulic actuation systems for aerospace applications.** *SAE Technical Paper* (2010).
- [49] DATASHEET. **Batscap, supercapacités - cellules 650f à 9000f.** www.batscap.com (2010).
- [50] DATASHEET. **Mc power series 650f - 3000f ultracapacitors.** *Maxwell technologies* (2010).

- [51] D.IZQUIERDO, R.AZCONA, F.J.L.CERRO, C.FERNANDEZ, AND B.DELICADO. **Electrical power distribution system, for application in more electric aircraft.** *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exhibition* (2010).
- [52] K.RAFAL, B.MORIN, X.ROBOAM, E.BRU, C.TURPIN, AND H.PIQUET. **Hybridization of an aircraft emergency electrical net work : Experimentation and benefits validation.** *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (2010).
- [53] N.RIZOUG, G.FELD, AND B.BARBEDETT. **Hybrid supply for automotive application using supercapacitor.** *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, France* (2010).
- [54] S.VAZQUEZ, S.M.LUKIC, E.GALVAN, L.G.FRANQUELO, AND J.M.CARRASCO. **Energy storage systems for transport and grid applications.** *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, Issue 12, pp. 3881-3895 (2010).
- [55] S.XIE, J.GONG, AND W.LIU. **Simulation and control of bus conditioner for a power distribution system of more electric aircraft.** *IEEE Conference on Mechatronics and Automation* (2010).
- [56] B.MORIN. **Mise au point expérimentale d'une hybridation pile à combustible et supercondensateurs pour un groupe de secours pour avion.** *Conférence jeunes chercheurs en génie électrique* (2011).
- [57] D.BIENAIMÉ. **Etude d'un réseau de bord d'un hélicoptère basée sur la représentation énergétique macroscopique.** *Conférence jeunes chercheurs en génie électrique* (2011).
- [58] I.CHRISTOU, A.NELMS, M.HUSBAND, AND I.COTTON. **Choice of optimal voltage for more electric aircraft wiring systems.** *IET Electrical system transport* (2011).
- [59] J.ASENSIO-SAUTO. **Modélisation et simulation d'un "starter/generator" fonctionnant sur un bus de tension continue multisource pour application hélicoptère.** *Conférence jeunes chercheurs en génie électrique* (2011).
- [60] J.BAERT. **Dimensionnement des sources secondaires d'une locomotive hybride par approche fréquentielle.** *Conférence jeunes chercheurs en génie électrique* (2011).
- [61] J.SOLANO.MARTINEZ. **Gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride basée sur la logique floue d'ordre 2.** *Conférence jeunes chercheurs en génie électrique* (2011).
- [62] X.ROBOAM, Q.LANGLOIS, H.PIQUET, B.MORIN, AND C.TRUPIN. **Hybrid power generation system for aircraft electrical emergency network.** *IET Electrical System in Transportation*, vol.1, Issue 4, pp.148-155 (2011).
- [63] F.RE. **Assessing environmental benefits of electric aircraft taxiing through object-oriented simulation.** *SAE International Journal of Aerospace* (2012).
- [64] F.RE. **Viability and state of the art of environmentally friendly aircraft taxiing systems.** *IEEE Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion* (2012).
- [65] IRENA. **Electricity storage and renewables for island power – a guide for decision makers.** *International Renewable Energy Agency* (2012).
- [66] J.C.SHAW, S.D.A.FLECHTER, P.J.NORMAN, AND S.J.GALLOWAY. **More electric power system concepts for an environmentally responsible aircraft.** *IET International Universities Power Engineering Conference* (2012).
- [67] M.GAZZINO. **State of art of more electric helicopter.** *Conference More Electric Aircraft 2012, 20-21 November - Bordeaux - France* (2012).

- [68] N.DEVILLERS. **Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique**. PhD thesis, Universté de Franche-Comté, 2012.
- [69] OF TRANSPORTATION FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, U. D. **Helicopter flying handbook**. *Technical manual* (2012).
- [70] T.SOUSA, H.MORAIS, AND Z.VALE. **Intelligent energy resource management consedering vehicle-to-grid : A simulated annealing approach**. *IEEE Power and Energy Society General Meeting* (2012).
- [71] T.SREEKUMAR, AND JIJ, K. **Comparison of proportional-integral (pi) and intergral-proportional (ip) controllers for speed control in vector controlled induction motor drive**. *International Conference On Power, Control and Embedded Systems* (2012).
- [72] X.ROBOAM, B.SARENI, AND A.DEANDRADE. **More eelectricity in the air : Toward optimized electrical networks embedded in more-electrical aircraft**. *IEEE Industrial Electronic s Magazine*, vol.6, Issue 4, pp.6-17 (2012).
- [73] D.HAN, J.NOPPAKUNKAJORN, AND B.SARLIOGLU. **Analysis of a sic three-phase voltage source inverter under various current and power factor operations**. *IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference* (2013).
- [74] JM.BARRANCA, S.BENELGHALI, R.OUTBIB, AND H.GUALOUS. **Sliding mode controllers for hybrid storage system composed by battery and ultracapacacitors**. *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 8th international Conference and Exhibition Automation* (2013).
- [75] J.TYLGAT. **The recyclinging efficiency of li-ion ev batteries according to the european commission regulation, and the relation with the end-of-life vehicles directive recycling rate**. *IEEE Electrics Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)* (2013).
- [76] T.DUBOIS. **Vers l'hélicoptère "plus électrique"**. *Article internet "www.aerobuzz.fr/helicoptere/vers-l-helicoptre-plus-electrique"*, publié le 22 janvier 2013 (2013).
- [77] D.HAN, J.NOPPAKUNKAJORN, AND B.SARLIOGLU. **Comprehensive efficiency, weight, and volume comparison of sic- and si-based bidirectional dc-dc converters for hybrid electric vehicles**. *IEEE Transport Vehicle Technologies* (2014).
- [78] D.SHIN, E.MACH, AND M.PONCINO. **Statistical battery models and variation-aware battery management**. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol.34, Issue 2, pp.252-265 (2014).
- [79] SAUTO, J. **Contribution au développement d'un système électrique multi-sources à courant continu pour hélicoptère plus électrique**. PhD thesis, Universté de Franche-Comté, 2014.
- [80] V.DEEPIKA, AND V.SRIKANTH. **Dc-dc converter control using ip controller**. *IEEE Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), International Conference* (2014).
- [81] **Site internet "www.sites.arte.tv/futurmag"**.
- [82] B.SARLIOGLU, AND C.T.MORRIS. **More electric aircraft - review, challenges and opportunities for commercial transport aircraft**. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* (2015).

- [83] J-P.BEEAUDET. **Le courant continu va-t-il supplanter le courant alternatif?** Article internet "www.filiere-3e.fr/2015/02/06/le-courant-continu-va-t-il-supplanter-le-courant-alternatif-dans-les-datacenters/", publié le 06 février 2015 (2015).
- [84] LIU, L., LI, C., SUN, H., HU, Y., GU, J., LI, T., XIN, J., AND ZHENG, N. **Deploying and managing hybrid energy buffers for improving datacenter efficiency and economy.** *IEEE Computer architecture (ISCA), ACM/IEEE 42nd Annual International Symposium on* (2015).
- [85] M.G.SERKTKAYA, E.YIIMAZ, A.E.SANIL, AND GUNLI, G. **Comparison of power and energy density after full shunting balancing in serial connected lithium-ion batteries and serial connected supercapacitors.** *Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (2015).
- [86] R.WEISS, L.OTT, AND U.BOEKE. **Energy efficient low-voltage dc-grids for commercial buildings.** *IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 154-158 (2015).
- [87] S.ONORI. **Identification and validation currents.** *Clemson University - International Center Automotive Research* (2015).
- [88] V.HERRERA, DE IBARRA, A., AND A.MILO. **Optimal energy management of a hybrid electric bus with a battery-supercapacitor storage system using genetic algorithm.** *Electrical Systems, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), IEEE International Conference* (2015).
- [89] V.HERRERA, H.GAZTANAGA, AND A.MILO. **Optimal energy management of a battery-supercapacitor based light rail vehicle using genetic algorithms.** *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE* (2015).
- [90] V.TEN, Z.YESSENBAYEV, AND A.SHAMSHIMOVA. **Optimized small-scaled hybrid energy management of a smart house based on genetic algorithm.** *Machine learning and Applications (ICMLA), IEEE 14th International Conference* (2015).
- [91] Y.FANG. **Réglage de la fréquence de coupure d'un filtre passe-bas - capture de température et traitement du signal.** *Rapport de stage* (2015).
- [92] **Site internet du concepteur "aquinea.fr/helicoptere-electrique-volta".**
- [93] **Site internet "www.boeing.com".**
- [94] **Site internet "www.connaissancedesenergies.org".**
- [95] **Site internet "www.insee.fr/fr/statistiques/2015759".**
- [96] **Site internet "www.solarimpulse.com".**
- [97] **Site internet "www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr".**
- [98] A.ALLAM, S. **Characterization of aging propagation in lithium-ion cells based on an electrochemical model.** *American Control Conference (ACC)* (2016).
- [99] D.BRANCHES-VILAR, AND C.DE-MATTOS-AFFONSO. **Residential energy management system with photovoltaic generation using simulated annealing.** *European Energy Market, 13th International Conference* (2016).
- [100] J.SHEN, AND A.KHALIGH. **Predictive control of a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles.** *Transportation Electrification Conference and Expo* (2016).
- [101] J.SINOUSI, S.BENELGHALI, R.OUTBIB, AND MF.MIMOUNI. **Sliding mode control for frequency-based energy management strategy of hybrid storage system in vehicular application.** *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), International Symposium* (2016).

- [102] L.LIGOCKI CANDEMIL. **Modèle de supercondensateur - assemblage en série et en parallèle des cellules**. *Rapport de stage* (2016).
- [103] P.SAENGER, N.DEVILLERS, K.DESCHINKEL, PÉRA, M., R.COUTURIER, AND F.GUSTIN. **Optimization of electrical energy storage system sizing for an accurate management in an aircraft**. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.66, Issue 7, pp.5572-5583 (2016).
- [104] **Source wikipedia "airbus helicopters h160"**.
- [105] **Source wikipedia "airbus helicopters h225m caracal"**.
- [106] **Source wikipedia "diagramme de bode"**.
- [107] D.L.GERBER, V.VOSSOS, W.FENG, A.KHANDEKAR, C.MARNAY, AND B.NORDMAN. **A simulation based comparison of ac and dc power distribution networks in buildings**. *IEEE International Conference on DC Microgrids (ICDCM)* (2017).
- [108] R.ABDELHEDI, AC.AMMARI, A.SARI, A.LAHYANI, AND P.VENET. **Optimal power sharing between batteries and supercapacitors in electric vehicles**. *Information and Digital Technologies (IDT) International Conference* (2017).
- [109] T.MESSAOUDI. **Caractérisation et modélisation d'une batterie lithium-ion**. *Rapport de stage* (2017).
- [110] ZHENG, W., MA, K., AND WANG, X. **Hybrid energy storage with supercapacitor for cost-efficient data center power shaving and capping**. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 28, Issue 4, pp. 1105-1118 (2017).

TABLE DES FIGURES

1.1	Avion "Solar Impulse" autonome en énergie [96].	2
1.2	Hélicoptère 100% électrique "Volta" [92].	2
2.1	Différentes natures d'énergie dans un aéronef conventionnel [20]	6
2.2	Architecture d'un biréacteur à réseaux électriques AC et DC (Airbus A330). Toutes les charges sont connectées à l'E/E Bay. (inspirée de [93])	7
2.3	Bus de tension à amplitude constante, à fréquence variable pour avion "plus électrique" [82].	8
2.4	Architecture d'un biréacteur à réseaux électriques AC et DC (Boeing 787). Les charges sont réparties sur les deux E/E Bay ou sur les unités éloignées.(inspirée de [93])	9
2.5	Principe de fonctionnement du taxi vert ou e-taxi	10
2.6	Hélicoptère Airbus X4 rebaptisé H160 [104].	12
2.7	Hélicoptère militaire Airbus H225M [105].	12
2.8	Architecture simplifiée d'un hélicoptère bimoteur	13
2.9	Diagramme de Ragone sur les moyens de stockage [68]	15
2.10	Spécificités des sources de stockage d'énergie [25]	16
2.11	Spécificités énergétiques des sources de stockage [68]	16
2.12	Diagramme de Ragone des éléments de stockage sélectionnés [68]	17
2.13	Nouvelle architecture électrique proposée pour le projet	18
2.14	Modèle quasi-statique de la batterie, avec $R_{bat} = f(T)$ et $E_0 = f(SOC, T)$ (T : température, SOC : état de charge)	19
2.15	Relevé de la tension et du courant de batterie - Décharge par palier à 20°C [68].	19
2.16	Évolution de la tension à vide en fonction de l'état de charge	20
2.17	Évolution de la résistance interne en fonction de l'état de charge	20
2.18	Courant de validation des caractéristiques des modèles [87] (Modèle de batterie : IHR-1860, 1900mAh)	21
2.19	Comparatif et écart entre tensions simulées et expérimentales à 20°C (Modèle de batterie : IHR-1860, 1900mAh)	22
2.20	Modèle de Foster de la batterie	22
2.21	Modèle dynamique retenu de la batterie	23

2.22 Comparatif et écart entre tensions simulées et expérimentales (Modèle de batterie : IHR-1860, 1900mAh)	23
2.23 Modèle quasi-statique du supercondensateur	24
2.24 Allure de la tension de sortie du supercondensateur lors d'une décharge à courant constant	25
2.25 Identification de la résistance interne du modèle quasi-statique - Zoom sur le début de la décharge à courant constant	25
2.26 Comparatif et écart entre tensions simulées et expérimentales	26
2.27 Modèle de Zubieta-Bonert du supercondensateur [14]	26
2.28 Schéma simplifié issu du modèle de Zubieta-Bonert	27
2.29 Comparatif et écart entre tensions simulées et expérimentales	27
2.30 Modèle d'un pack de batteries	28
2.31 Modèle d'un pack de supercondensateurs	29
2.32 Schéma Simulink du modèle dynamique de batteries avec les tolérances constructeur	30
2.33 Schéma Simulink du modèle dynamique de supercondensateurs avec les tolérances constructeur	31
2.34 Assemblage série de cinq batteries	32
2.35 Assemblage série de cinq supercondensateurs	32
2.36 Assemblage en parallèle de trois batteries	33
2.37 Assemblage en parallèle de trois supercondensateurs - Travail réalisé en partie par Lucas Ligocki Candemil, stagiaire au sein du laboratoire Femto-st du 29 mars au 20 mai 2016, en dernière année de licence ingénierie électrique à l'UFRSTGI Louis Néel de Belfort [102].	34
3.1 Architectures électriques embarquées standards	38
3.2 Batteries - Supercondensateurs couplés à un convertisseur Boost - Filiation Figure 3.1 (a)	40
3.3 Batteries couplées à un convertisseur Boost et Supercondensateurs sur le bus DC - Filiation Figure 3.1 (b)	41
3.4 Supercondensateurs couplés à un convertisseur Boost et Batteries sur le bus DC - Filiation Figure 3.1 (b)	41
3.5 Batteries couplées à un convertisseur Boost et Supercondensateurs couplés à un convertisseur Boost - Filiation Figure 3.1 (c)	41
3.6 Batteries seules sur le bus DC	42
3.7 Batteries couplées à un convertisseur Boost	42
3.8 Fin de profil - démarrage d'un moteur	43
3.9 Répartition des demandes de puissances et d'énergie par approche fréquentielle	44
3.10 Répartition des puissances et énergie entre packs	45

3.11	Stabilisation de la tension du bus - Ajustement du coefficient multiplicateur m du convertisseur Boost	46
3.12	Exemple de convertisseur entrelacé à trois branches	47
3.13	Connexion du convertisseur entrelacé trois branches à un seul pack	47
3.14	Exemple de connexion du convertisseur trois branches aux deux packs	48
3.15	Projection du diagramme de Ragone sur un plan fréquentiel [68]	50
3.16	Diagramme de Bode du filtre passe-bas d'ordre 1 [106]	51
3.17	Modèle quasi-statique de batterie	52
3.18	Modèle quasi-statique équivalent du pack de batteries	52
3.19	Modèle quasi-statique de supercondensateurs	54
3.20	Pertes en fonction des architectures électriques et du courant demandé	56
3.21	Évolution de la capacité d'une batterie en fonction de la température	61
3.22	Évolution de la résistance interne d'une batterie en fonction de la température	61
4.1	Obtention du profil de puissance	64
4.2	Répartition de la demande de puissance et de l'énergie à stocker	65
4.3	Modèle quasi-statique de batterie	66
4.4	Modèle quasi-statique de supercondensateur	66
4.5	Tension maximale en sortie de pack	69
4.6	Évolution du profil de courant en fonction du profil de puissance sur une partie du temps de simulation	71
4.7	Obtention du profil de courant - Réalisé sous Matlab-Simulink	71
4.8	Tension minimale en sortie de pack	72
4.9	Répartition des puissances fournies par les packs sur le convertisseur Boost DC/DC	73
4.10	Matrice produit MP_{bat} et MP_{sc}	75
4.11	Probabilité de retenir un "moins bon" voisin	79
4.12	Évolution de la température θ en fonction de l'état d'avancement du recuit	80
4.13	Principe de création de nouveaux individus	86
4.14	Densité de probabilité en fonction de l'itération g entre -1 et 1	86
4.15	Probabilité de mutation en fonction de la génération en cours	87
5.1	Tension de sortie du pack à $T=26,7^{\circ}\text{C}$	95
5.2	Tension de sortie du pack en fonction de la température	95
5.3	Puissance max pouvant être délivrée en fonction de la température	96
5.4	Énergie nécessaire pour alimenter la charge	96
5.5	Tension de sortie du pack à $T=41^{\circ}\text{C}$	97

5.6	Tension de sortie du pack en fonction de la température	97
5.7	Courant demandé en fin de profil à $T=41^{\circ}\text{C}$	98
5.8	Évolution de la résistance équivalente en fonction de la température	98
5.9	Puissance max pouvant être délivrée en fonction de la température	98
5.10	Énergie nécessaire pour alimenter la charge	99
5.11	Tension de sortie du pack à $T=7,6^{\circ}\text{C}$	100
5.12	Tension de sortie du pack de batteries vs température	100
5.13	Courants demandés en fin de profil à $T=7,6^{\circ}\text{C}$	101
5.14	Courants max pouvant être délivrés comparé au courant max demandé en fonction de la température	101
5.15	Réglage de la fréquence de coupure du filtre passe-bas en fonction de la température pour maintenir la tension minimale $\geq 0,5pu$ en sortie de batteries	102
5.16	Tension fournie en fin de profil par les packs - Réglage de la fréquence de coupure en fonction de la température. Travail réalisé en partie par Yi Fang, stagiaire au sein du laboratoire Femto-st du 1 avril au 30 septembre 2015, en dernière année de Master énergie électrique à l'UFRSTGI Louis Néel de Belfort [91].	102
5.17	Courant demandé en fin de profil aux batteries et aux supercondensateurs	103
5.18	Énergie demandée au pack de batteries	104
5.19	Ratio de tension des supercondensateurs durant le profil	104
5.20	Tension de sortie du pack à $T=38,6^{\circ}\text{C}$	105
5.21	Tension de sortie du pack de batteries vs température	105
5.22	Ratio de tension des supercondensateurs sur l'ensemble du profil de mission	106
5.23	Énergie demandée au pack de batteries	106
5.24	Évolution de la résistance interne des batteries en fonction de la température - La valeur de résistance est identique à $38,6^{\circ}\text{C}$ et à 52°C (bornes de température où le système est fonctionnel)	107
5.25	Réglage de la fréquence de coupure du filtre passe-bas en fonction de la température pour maintenir la tension minimale $\geq 0,5pu$ en sortie de batteries	107
5.26	Réglage de la fréquence de coupure du filtre passe-bas en fonction de la température pour maintenir la tension minimale $\geq 0,5pu$ en sortie de batteries	108
5.27	Réglage de la fréquence de coupure du filtre passe-bas en fonction de la température pour maintenir la tension minimale $\geq 0,5pu$ en sortie de batteries	108
5.28	Tension de sortie des packs à $T=30,8^{\circ}\text{C}$	110
5.29	Tension de sortie des packs vs température	110
5.30	Courant demandé en fin de profil aux batteries et aux supercondensateurs à $T=30,8^{\circ}\text{C}$	111
5.31	Courant demandé en fin de profil aux batteries et aux supercondensateurs à $T=-25^{\circ}\text{C}$	111

5.32	Énergie demandée au pack de batteries	112
5.33	Ratio de tension des supercondensateurs durant le profil	112
5.34	Tension de sortie des packs à $T = -25^{\circ}\text{C}$	113
5.35	Tension de sortie des packs vs température	113
5.36	Courants maximums de sortie des packs en fonction de la température	114
5.37	Énergie demandée au pack de batteries	115
5.38	Ratio de tension des supercondensateurs durant le profil	115
5.39	Modèle dynamique de batterie basé sur le modèle de Foster - Modèle du premier ordre	116
5.40	Banc chambre thermique et système d'acquisition	117
5.41	Décharge de la batterie à 0,5C à différentes températures	118
5.42	Profil du courant d'identification - Répété 7 fois de $\text{SOC}_0 = 1$ à $\text{SOC}_7 \approx 0,3$ (avec $0 \leq n \leq 6$) [87]	119
5.43	Réponse en tension de la batterie à $T = 5^{\circ}\text{C}$ en début de profil de courant d'identification - Détermination de la tension à vide	119
5.44	Réponse en tension de la batterie à $T = 5^{\circ}\text{C}$ en début de profil de courant d'identification - Détermination de la valeur de résistance R_0	120
5.45	Réponse en tension de la batterie à $T = 5^{\circ}\text{C}$ en début de profil de courant d'identification - Détermination des valeurs de résistance R_1 et de condensateur C_1	120
5.46	Courbes 3D obtenues par approximation des différents points calculés pour E_0 , R_0 , R_1 et C_1 en fonction de l'état de charge et de la température	122
5.47	Comparaison entre les tensions de sortie réelle et du modèle	123
5.48	Ecart entre les tensions de sortie	123
5.49	Sous Simulink - Répartition des courants et tension de sortie en fonction des caractéristiques des batteries et du courant demandé	125
5.50	Exemple de schéma Simulink de pack de batteries généré	126
5.51	Modèle de Zubieta-Bonert à deux branches d'un supercondensateur	127
5.52	Sous Simulink - Répartition des courants et tension de sortie en fonction des caractéristiques des supercondensateurs et du courant demandé	130
5.53	Exemple de schéma Simulink de pack de supercondensateur généré	131
5.54	Validation - Modèle REM du système	133
5.55	Validation - Tension en sortie du pack de batteries (donc du bus)	133
5.56	Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique	133
5.57	Validation - Modèle REM du système	134
5.58	Validation - Tension en sortie du pack de batteries	135
5.59	Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique	135

5.60 Validation - Comparatif entre SOC avec les packs de batteries quasi-statiques et dynamiques	135
5.61 Validation - Courant demandé au pack - Comparatif entre courants avec le pack de batteries quasi-statiques et dynamiques	136
5.62 Validation - Zoom sur le courant demandé lors du pic en fin de profil	136
5.63 Validation - Modèle REM du système	137
5.64 Validation - Tensions en sortie des pack de batteries et de supercondensateurs .	138
5.65 Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique du schéma REM	138
5.66 Validation - Courants demandés aux packs en fin de profil	139
5.67 Validation - Évolution de l'état de charge des batteries et du ratio de tension des supercondensateurs	139
5.68 Validation - Modèle REM du système	140
5.69 Validation - Courants demandés aux batteries et aux supercondensateurs . . .	141
5.70 Validation - Évolution de l'état de charge des batteries et du ratio de tension des supercondensateurs	141
5.71 Validation - Tensions en sortie des pack de batteries et de supercondensateurs .	141
5.72 Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique des batteries . .	141
5.73 Validation - Courants demandés au pack de batteries à 28°C	142
5.74 Validation - Tension de sortie du pack de batteries à 28°C	142
5.75 Validation - Courants demandés au pack de batteries à 55°C	142
5.76 Validation - Tension de sortie du pack de batteries à 55°C	142
5.77 Validation - Modèle REM du système	143
5.78 Validation - Tensions en sortie des pack de batteries et de supercondensateurs .	144
5.79 Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique du schéma REM	144
5.80 Validation - Courants demandés aux batteries et aux supercondensateurs . . .	144
5.81 Validation - Évolution de l'état de charge des batteries et du ratio de tension des supercondensateurs	144
5.82 Validation - Modèle REM du système	145
5.83 Validation - Répartition des courants programmée dans le bloc gestion d'énergie	146
5.84 Validation - Tensions en sortie des pack de batteries et de supercondensateurs .	147
5.85 Validation - Écart entre le modèle quasi-statique et dynamique du schéma REM	147
5.86 Validation - Courants demandés aux batteries et aux supercondensateurs . . .	147
5.87 Validation - Évolution de l'état de charge des batteries et du ratio de tension des supercondensateurs	148
5.88 Propriétés de l'architecture "Pack de batteries seul".	149
5.89 Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".	149
5.90 Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".	150

5.91 Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".	150
5.92 Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".	151
5.93 Propriétés de l'architecture "Pack de batteries avec convertisseur".	151

LISTE DES TABLES

3.1	Liste des batteries utilisées	49
3.2	Liste des supercondensateurs utilisés	50
3.3	Performances de la batterie Lithium-ion et du supercondensateur([110] - 2016)	56
3.4	Synthèse des pertes par architecture	57
3.5	Synthèse de la durée de vie des batteries et du coût par architecture	60
4.1	Liste des caractéristiques de batteries regroupées dans la variable BAT	66
4.2	Liste des caractéristiques de supercondensateurs regroupées dans la variable SC	67
4.3	Analogie entre le recuit physique et le recuit simulé	77
4.4	Modifications apportées à la fonction-objectif en fonction de l'architecture choisie	90
5.1	Valeurs trouvées pour chaque caractéristique interne de la batterie 2Ah à dif- férents états de charge et température	121
5.2	Exemple de caractéristiques de modèle de Zubieta-Bonert de supercondensateur	127
5.3	Éléments de la REM	132
A.1	Liste des variables	176
A.2	Liste des variables	177
A.3	Liste des variables	178

A

ANNEXES

1/ GLOSSAIRE

TABLE A.1 – Liste des variables

Variables	Désignation / signification	Unité
Variables de dimensionnement		
N	Nombre de cellules dans un pack	
NS	Nombre de cellules en série dans un pack	
NP	Nombre de cellules en parallèle dans un pack	
N_{bat}	Nombre de batteries dans un pack	
NS_{bat}	Nombre de batteries en série dans un pack	
NP_{bat}	Nombre de batteries en parallèle dans un pack	
N_{sc}	Nombre de supercondensateurs dans un pack	
NS_{sc}	Nombre de supercondensateurs en série dans un pack	
NP_{sc}	Nombre de supercondensateurs en parallèle dans un pack	
β	Pénalité appliquée sur la fonction-objectif ($\beta \times T$)	
Variables d'environnement		
T	Température ambiante	°C
$masse$	Masse totale du système	g
$masse_{conv}$	Masse du convertisseur	g
$masse_{conv_{bat}}$	Masse du convertisseur en sortie du pack de batteries	g
$masse_{conv_{sc}}$	Masse du convertisseur en sortie du pack de supercondensateurs	g
$masse_{pack_{bat}}$	Masse du pack de batteries	g
$masse_{pack_{sc}}$	Masse du pack de supercondensateurs	g
$masse_{bat}$	Masse d'une batterie	g
$masse_{sc}$	Masse d'un supercondensateur	g
C_{conv}	Condensateur en sortie du convertisseur Boost	mF
L_{conv}	Inductance du convertisseur Boost	μ H
BAT	Structure des caractéristiques des batteries	
SC	Structure des caractéristiques des supercondensateurs	
Variables de loi de gestion		
f_c	Fréquence de coupure	Hz
DOD	Profondeur de décharge des batteries	
DOD_{max}	Profondeur de décharge maximale tolérée par les batteries	
SOC	État de charge des batteries ($SOC = 1 - DOD$)	

TABLE A.2 – Liste des variables

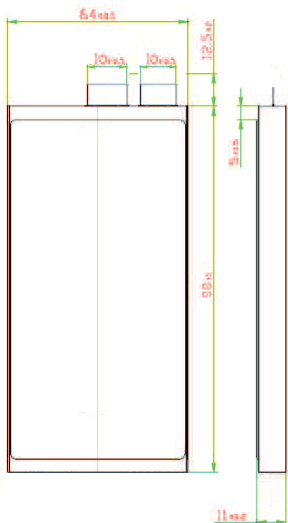
Variables	Désignation / signification	Unité
Variables de loi de gestion		
SOC_{min}	État de charge minimum toléré des batteries ($SOC_{min} = 1 - DOD_{max}$)	
dsc	Ratio de tension des supercondensateurs	
U_{bus}	Tension du bus DC	V
$U_{bus_{min}}$	Tension minimale tolérée sur le bus DC	V
$U_{bus_{max}}$	Tension maximale tolérée sur le bus DC	V
U_{pack}	Tension de sortie d'un pack	V
$U_{pack_{min}}$	Tension minimale de sortie d'un pack	V
$U_{pack_{max}}$	Tension maximale de sortie d'un pack	V
$U_{pack_{bat}}$	Tension de sortie du pack de batteries	V
$U_{pack_{bat_{min}}}$	Tension minimale de sortie du pack de batteries	V
$U_{pack_{bat_{max}}}$	Tension maximale de sortie du pack de batteries	V
$U_{pack_{sc}}$	Tension de sortie du pack de supercondensateurs	V
$U_{pack_{sc_{min}}}$	Tension minimale de sortie du pack de supercondensateurs	V
$U_{pack_{sc_{max}}}$	Tension maximale de sortie du pack de supercondensateurs	V
U_{cell}	Tension de sortie d'une cellule du pack	V
$U_{cell_{min}}$	Tension minimale tolérée sur une cellule du pack	V
$U_{cell_{max}}$	Tension maximale tolérée sur une cellule du pack	V
U_{bat}	Tension de sortie d'une batterie	V
$U_{bat_{min}}$	Tension minimale tolérée sur une batterie	V
$U_{bat_{max}}$	Tension maximale tolérée sur une batterie	V
U_{sc}	Tension de sortie d'un supercondensateur	V
$U_{sc_{min}}$	Tension minimale tolérée sur un supercondensateur	V
$U_{sc_{max}}$	Tension maximale tolérée sur un supercondensateur	V
I_{profil}	Courant de profil	A
$I_{profil_{max}}$	Courant maximum du profil	A
I_{pack}	courant demandé à un pack	A
$I_{pack_{max}}$	Courant maximum demandé à un pack	A
$I_{pack_{bat}}$	Courant demandé au pack de batteries	A
$I_{pack_{bat_{max}}}$	Courant maximum demandé au pack de batteries	A
$I_{pack_{sc}}$	Courant demandé au pack de supercondensateurs	A
$I_{pack_{sc_{max}}}$	Courant maximum de sortie du pack de supercondensateurs	A
I_{cell}	Courant demandé à une cellule du pack	A
$I_{cell_{max}}$	Courant maximum demandé à une cellule du pack	A
I_{bat}	Courant demandé à une batterie	A
$I_{bat_{max}}$	Courant maximum supporté à une batterie	A
I_{sc}	Courant demandé à un supercondensateur	A
$I_{sc_{max}}$	Courant maximum supporté par un supercondensateur	A
P_{profil}	Puissance demandée par le profil	W
$P_{profil_{max}}$	Puissance maximale demandée par le profil	W
P_{pack}	Puissance demandée à un pack	W
$P_{pack_{max}}$	Puissance maximale demandée à un pack	W
$P_{pack_{bat}}$	Puissance demandée au pack de batteries	W
$P_{pack_{bat_{max}}}$	Puissance maximale demandée au pack de batteries	W
$P_{pack_{sc}}$	Puissance demandée au pack de supercondensateurs	W
$P_{pack_{sc_{max}}}$	Puissance maximale demandée au pack de supercondensateurs	W

TABLE A.3 – Liste des variables

Variables	Désignation / signification	Unité
Variables de loi de gestion		
W_{pack}	Energie à stocker dans un pack	Wh
$W_{pack_{bat}}$	Energie stockée par le pack de batteries	Wh
$W_{pack_{sc}}$	Energie stockée par le pack de supercondensateurs	Wh
$W_{bat_{max}}$	Energie maximale stockée par une batterie	J
$W_{sc_{max}}$	Energie maximale stockée par un supercondensateur	J
α	Rapport cyclique du convertisseur Boost	
m	Coefficient multiplicateur appliqué au convertisseur Boost	
I_L	Courant traversant la bobine du convertisseur Boost	
$I_{L_{min}}$	Courant maximum traversant la bobine du convertisseur	
$I_{L_{max}}$	Courant minimum traversant la bobine du convertisseur	
T_{conv}	Période de hachage du convertisseur Boost	

2/ FICHE TECHNIQUE - LI-ION POLYMERE 2AH

Cell Specification on SLPB486495P

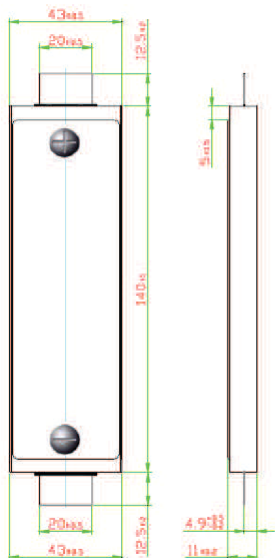


● Typical Capacity ¹⁾		2 Ah
● Nominal Voltage		3.7 V
● Charge Condition	Max. Current	2 A
	Voltage	4.2V ± 0.03V
● Discharge Condition	Continuous Current	40 A
	Peak Current	80 A
	Cut-off Voltage	3.0V
● Cycle Life (at 80% DOD) ²⁾		> 1,000Cycles
● Operating Temp.	Charge	0~40℃
	Discharge	-20~60 ℃
● Dimension	Thickness (mm)	5.0 ± 0.2
	Width (mm)	64 ± 0.5
	Length (mm)	98 ± 0.5
● Weight (g)		66 ± 1.8

1) Typical Capacity : 0.5CmA, 4.2~3.0V @25°C,
2) Voltage range : 4.15V ~3.40V

3/ FICHE TECHNIQUE - LI-ION POLYMERE 4,8AH

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

4/ SUPERCONDENSATEURS MAXWELL

DATASHEET

K2 ULTRACAPACITORS - 2.7V SERIES

FEATURES AND BENEFITS*

- DuraBlue™ Shock and Vibration Technology¹
- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- High power and energy
- 650F to 3,000F capacitance range
- Threaded terminals or laser-weldable posts

TYPICAL APPLICATIONS

- High shock and vibration environments
- Automotive subsystems
- Wind turbine pitch control
- Hybrid vehicles
- Rail
- Heavy industrial equipment
- UPS & telecom systems

PRODUCT SPECIFICATIONS¹

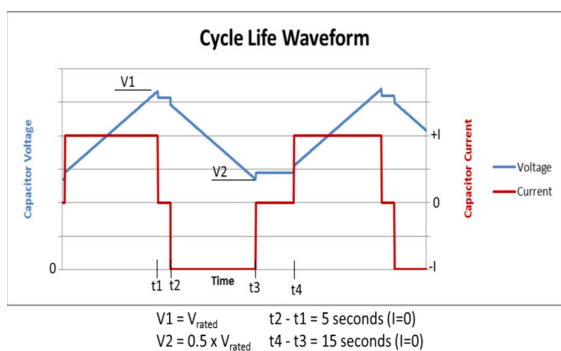
ELECTRICAL	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000 ¹
Rated Voltage	2.70 V	2.70 V	2.70 V	2.70 V	2.70 V
Minimum Capacitance, initial ² , rated value	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Maximum Capacitance, initial ²	780 F	1,440 F	1,800 F	2,400 F	3,600 F
Maximum ESR _{DC} , initial ² , rated value	0.8 mΩ	0.58 mΩ	0.47 mΩ	0.35 mΩ	0.29 mΩ
POWER & ENERGY					
Usable Specific Power, P _d ³	6.8 kW/kg	5.8 kW/kg	6.6 kW/kg	6.9 kW/kg	5.9 kW/kg
Impedance Match Specific Power, P _{max} ⁴	14 kW/kg	12 kW/kg	14 kW/kg	14 kW/kg	12 kW/kg
Specific Energy, E _{max} ⁵	4.1 Wh/kg	4.7 Wh/kg	5.4 Wh/kg	5.6 Wh/kg	6.0 Wh/kg
Stored Energy, E _{stored} ^{6,13}	0.66 Wh	1.22 Wh	1.52 Wh	2.03 Wh	3.04 Wh
SHOCK & VIBRATION					
Vibration Specification	ISO 16750-3, Table 14	ISO 16750-3, Table 14	ISO 16750-3, Table 14	ISO 16750-3, Table 14	ISO 16750-3, Tables 12 & 14
Shock Specification	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464 IEC 60068-2-27, -29
SAFETY					
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	3,400 A	4,700 A	5,700 A	7,700 A	9,300 A
Certifications	UL810a, RoHS, REACH	UL810a, RoHS, REACH	UL810a, RoHS, REACH	UL810a, RoHS, REACH	UL810a, RoHS, REACH
THERMAL					
Thermal Resistance (R _{ca} , Case to Ambient), typical	6.5°C/W	5.3°C/W	4.5°C/W	3.8°C/W	3.2°C/W
Thermal Capacitance (C _{th}), typical	190 J/°C	300 J/°C	320 J/°C	410 J/°C	600 J/°C
Maximum Continuous Current (ΔT = 15°C) ⁷	54 A _{RMS}	70 A _{RMS}	84 A _{RMS}	110 A _{RMS}	130 A _{RMS}
Maximum Continuous Current (ΔT = 40°C) ⁷	88 A _{RMS}	110 A _{RMS}	140 A _{RMS}	170 A _{RMS}	210 A _{RMS}

*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase.
See the warranty details for applicable operating and use requirements.

DATASHEET K2 ULTRACAPACITORS - 2.7V SERIES

NOTES

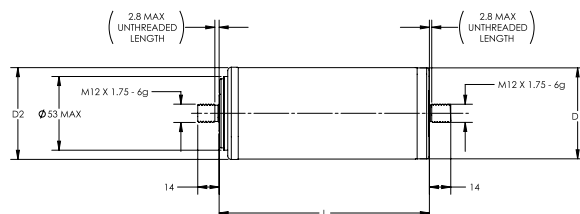
1. Only BCAP3000 currently has DuraBlue™ technology.
2. Capacitance and ESR_{DC} measured using 65 A for BCAP0650, 75 A for BCAP1200 and 100 A test current for all other cells. All tests made at 25°C per document number 1007239 available at maxwell.com.
3. Per IEC 62391-2, $P_d = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times \text{mass}}$
4. $P_{\text{max}} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times \text{mass}}$
5. $E_{\text{max}} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600 \times \text{mass}}$
6. $E_{\text{stored}} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600}$
7. $\Delta T = I_{\text{RMS}}^2 \times ESR \times R_{ca}$
8. After 72 hours at rated voltage. Initial leakage current can be higher.
9. Absolute maximum voltage, non-repeated. Not to exceed 1 second.
10. Cycle using specified test current per waveform below.
11. Cycle life varies depending upon application-specific characteristics. Actual results will vary.
12. Maximum Torque is 14 Nm.
13. Per United Nations material classification UN3499, all Maxwell ultracapacitors have less than 10 Wh capacity to meet the requirements of Special Provisions 361. When packaged according to the regulation, both individual ultracapacitors and modules composed of those ultracapacitors shipped by Maxwell can be transported without being treated as dangerous goods (hazardous materials).



DATASHEET

K2 ULTRACAPACITORS - 2.7V SERIES

BCAPXXXX P270 K04



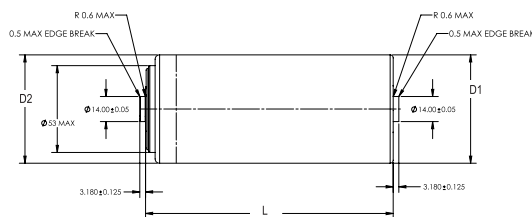
MOUNTING RECOMMENDATIONS

Do not reverse polarity. Please refer to document number 1016419, available at maxwell.com for welding recommendations.

MARKINGS

Products are marked with the following information: Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive terminal, warning marking, serial number.

BCAPXXXX P270 K05



Part Description	Dimensions (mm)			Package Quantity
	L (±0.3mm)	D1 (±0.2mm)	D2 (±0.7mm)	
BCAP0650 P270 K04/05	51.5	60.4	60.7	30
BCAP1200 P270 K04/05	74	60.4	60.7	30
BCAP1500 P270 K04/05	85	60.4	60.7	30
BCAP2000 P270 K04/05	102	60.4	60.7	15
BCAP3000 P270 K04/05	138	60.4	60.7	15

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. All products featured on this datasheet are covered by the following U.S. patents and their respective counterparts: 6643119, 7295423, 7342770, 7352558, 7384433, 7440258, 7492571, 7508651, 7580243, 7791860, 7791861, 7859826, 7883553, 7935155, 8072734, 8098481, 8279580, and patents pending.



Maxwell Technologies, Inc.
Global Headquarters
 3888 Calle Fortunada
 San Diego, CA 92123
 USA
 Tel: +1 (858) 503-3300
 Fax: +1 (858) 503-3301



Maxwell Technologies SA
 Route de Montena 65
 CH-1728 Rossens
 Switzerland
 Tel: +41 (0)26 411 85 00
 Fax: +41 (0)26 411 85 05



Maxwell Technologies, GmbH
 Leopoldstrasse 244
 80807 München
 Germany
 Tel: +49 (0)89 4161403 0
 Fax: +49 (0)89 4161403 99



Maxwell Technologies
Shanghai Trading Co. Ltd.
 Unit A28C, 12th Floor
 Huarun Times Square
 500 Zhangyang Road, Pudong
 Shanghai 200122, P.R. China
 Tel: +86 21 3852 4000
 Fax: +86 21 3852 4099



Maxwell Technologies Korea Co., Ltd.
 Room 1524, D-Cube City Office Tower, 15F
 #662 Gyeongin-Ro, Guro-Gu,
 Seoul, Korea 152-706
 Tel: +82 10 4518 9829

MAXWELL TECHNOLOGIES, MAXWELL, MAXWELL CERTIFIED INTEGRATOR, ENABLING ENERGY'S FUTURE, BOOSTCAP, C CELL, D CELL and their respective designs and/or logos are either trademarks or registered trademarks of Maxwell Technologies, Inc. and may not be copied, imitated or used, in whole or in part, without the prior written permission from Maxwell Technologies, Inc. All contents copyright © 2014 Maxwell Technologies, Inc. All rights reserved. No portion of these materials may be reproduced in any form, or by any means, without prior written permission from Maxwell Technologies, Inc.

5/ SUPERCONDENSATEURS BATSCAP









Supercapacités - cellules

Des solutions innovantes et compétitives



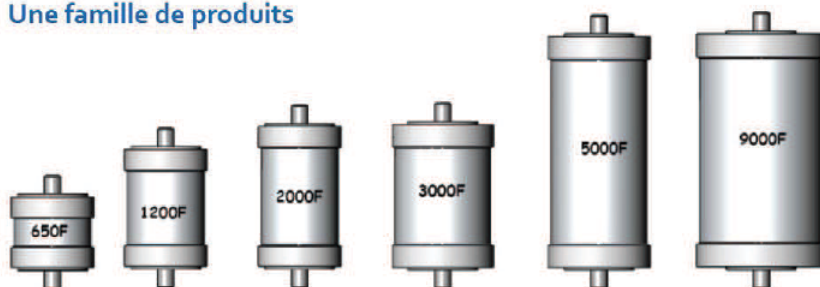
Caractéristiques principales

- 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

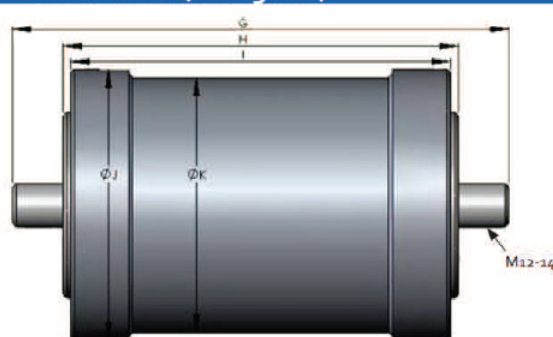
supercaps@batscap.com
Tél. +33 (0)2 98 66 72 00

www.batscap.com

L'engagement à long
terme d'un groupe
www.bolloré.com



Dimensions (sans gaine)

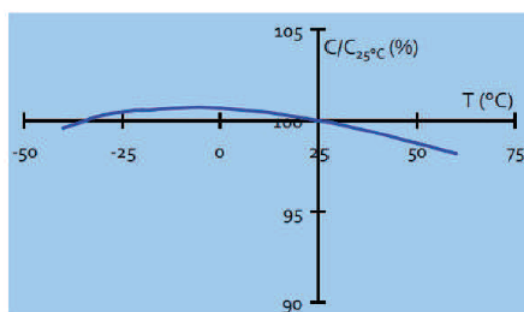


(en mm)	G	H	I	J	K
C650F	83.5	55.5	51.5	60.5	56
C1200F	106	78	74	60.5	56
C2000F	134	106	102	60.5	56
C3000F	136	108	104	74.5	70
C5000F	200	172	168	74.5	70
C9000F	202	174	170	94.5	90

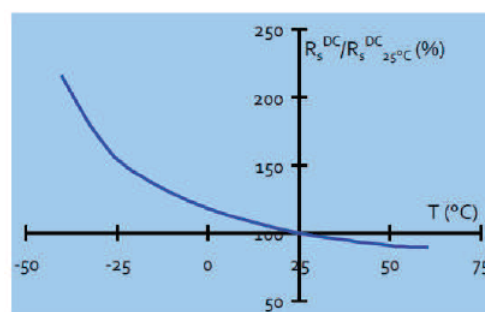
Spécifications

	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

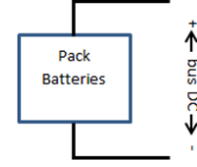
Les spécifications sont sujettes à modification sans préavis

© 2007 Batscap. Tous droits réservés. Batscap et le logo Batscap sont des marques enregistrées de Batscap

Rev 1.0

6/ ESTIMATION DES PERTES DE PUISSANCE PAR ARCHITECTURE

6.1/ PERTES POUR L'ARCHITECTURE "PACK DE BATTERIES SEUL"



Un pack de batteries seul peut répondre au profil de puissance demandé. Ainsi, les pertes de puissances du système ne sont dues qu'aux seules caractéristiques internes des batteries. Pour un modèle quasi-statique de batteries avec des caractéristiques internes parfaitement identiques 3.17, on a :

— Tension équivalente à vide du pack :

$$E_{0_{pack_{bat}}} = N S_{bat} \times E_0 \quad (A.1)$$

— Résistance interne équivalente du pack :

$$R_{pack_{bat}} = \frac{N S_{bat}}{N P_{bat}} \times R_{bat} \quad (A.2)$$

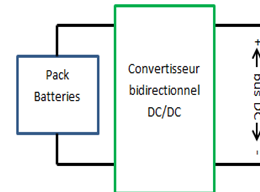
— Bilan des puissances :

$$P_{pack_{bat}} - \Sigma P_{pertes} = P_{profil} \quad (A.3)$$

D'après les équations A.1, A.2 et A.3, les pertes de puissance pour un branchement du pack de batteries directement sur le bus DC sont obtenues :

$$\begin{aligned} (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I) - (R_{pack_{bat}} \cdot I^2) &= P_{profil} \\ \Rightarrow \Sigma P_{pertes} &= R_{pack_{bat}} \cdot I^2 \end{aligned} \quad (A.4)$$

6.2/ PERTES POUR L'ARCHITECTURE "PACK DE BATTERIES AVEC CONVERTISSEUR"

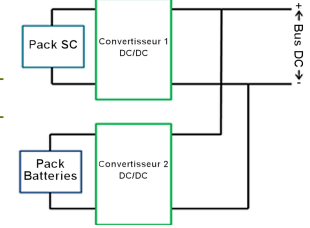


Pour stabiliser la tension du bus DC, un convertisseur Boost doit être ajouté en sortie de pack. En première approche, pour notre optimisation, il est considéré que celui-ci restitue 95% de la puissance reçue. D'après les équations A.1, A.2 et A.3, les pertes de puissances sont :

$$\begin{aligned} 0,95 \times \left[(E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I) - (R_{pack_{bat}} \cdot I^2) \right] &= P_{profil} \\ \Rightarrow (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I) - \left[0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I^2) \right] &= P_{profil} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Sigma P_{pertes} = 0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I^2) \quad (A.5)$$

6.3/ PERTES POUR L'ARCHITECTURE "PACK DE BATTERIES AVEC CONVERTISSEUR ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS AVEC CONVERTISSEUR"



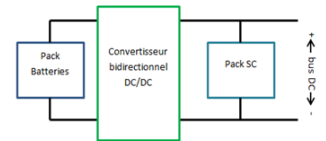
La pente des rampes de puissance durant le profil sélectionné est importante ($\sim 500W$ en $0,5s$), notamment à la fin pour démarrer le moteur thermique. Le vieillissement des batteries s'en trouve accéléré. Un pack de supercondensateurs est davantage conçu pour répondre à un brusque changement de demande de puissance. En connectant un convertisseur en sortie de chaque pack, le bilan des puissances devient :

$$P_{pack_{bat}} + P_{pack_{sc}} - \Sigma P_{pertes} = P_{profil} \quad (A.6)$$

Ainsi d'après les équations A.1, A.2 et A.6 , les pertes de puissances sont :

$$\begin{aligned} & 0,95 \times \underbrace{\left(E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} - R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 \right)}_{\text{Pack batteries}} + 0,95 \times \underbrace{\left(U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc} - R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2 \right)}_{\text{Pack supercondensateurs}} = P_{profil} \\ \Rightarrow & \left(E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} \right) + \left(U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc} \right) \\ & - \left[0,05 \times \left(E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} + U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc} \right) + 0,95 \times \left(R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 + R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2 \right) \right] = P_{profil} \\ \Rightarrow & \Sigma P_{pertes} = 0,05 \times \left(E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} + U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc} \right) + 0,95 \times \left(R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 + R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2 \right) \end{aligned} \quad (A.7)$$

6.4/ PERTES POUR L'ARCHITECTURE "PACK DE BATTERIES AVEC CONVERTISSEUR ET PACK DE SUPERCONDENSATEURS SUR LE BUS DC"

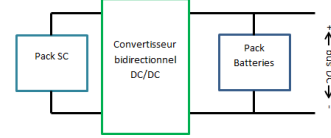


Dans ce cas, en plus des pertes dues aux caractéristiques internes des composants des packs, il est nécessaire de prendre en compte les pertes liées au convertisseur utilisé. D'après les équations A.1, A.2 et A.6, lorsque le pack de supercondensateurs est connecté directement sur le bus, on a :

$$0,95 \times \underbrace{\left(E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} - R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 \right)}_{\text{Pack batteries}} + \underbrace{\left(U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc} - R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2 \right)}_{\text{Pack supercondensateurs}} = P_{profil}$$

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat}) + (U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc}) \\
&- [0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat}) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2) + R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2] = P_{profil} \\
&\Rightarrow \Sigma P_{pertes} = 0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat}) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2) + R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2 \quad (A.8)
\end{aligned}$$

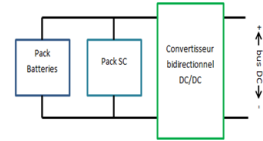
6.5/ PERTES POUR L'ARCHITECTURE "PACK DE SUPER-CONDENSATEURS AVEC CONVERTISSEUR ET PACK DE BATTERIES SUR LE BUS DC"



Et pour le pack de batteries directement connecté au bus :

$$\begin{aligned}
&\underbrace{(E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} - R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2)}_{\text{Pack batteries}} + 0,95 \times \underbrace{(U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc} - R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2)}_{\text{Pack supercondensateurs}} = P_{profil} \\
&\Rightarrow (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat}) + (U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc}) \\
&- [0,05 \times (U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc}) + R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 + 0,95 \times (R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2)] = P_{profil} \\
&\Rightarrow \Sigma P_{pertes} = 0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat}) + R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 + 0,95 \times (R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2) \quad (A.9)
\end{aligned}$$

6.6/ PERTES POUR L'ARCHITECTURE "PACK DE SUPER-CONDENSATEURS, PACK DE BATTERIES COUPLÉS À UN CONVERTISSEUR"



En dernier lieu, lorsque les deux packs sont connectés entre eux et le convertisseur Boost fait le lien entre packs et bus DC, d'après les équations A.1, A.2 et A.6, on a :

$$\begin{aligned}
&0,95 \times \left(\underbrace{(E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} - R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2)}_{\text{Pack batteries}} + \underbrace{(U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc} - R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2)}_{\text{Pack supercondensateurs}} \right) = P_{profil} \\
&\Rightarrow (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat}) + (U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc}) \\
&- [0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} + U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc}) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 + R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2)] = P_{profil} \\
&\Rightarrow \Sigma P_{pertes} = 0,05 \times (E_{0_{pack_{bat}}} \cdot I_{bat} + U_{pack_{sc0}} \cdot I_{sc}) + 0,95 \times (R_{pack_{bat}} \cdot I_{bat}^2 + R_{pack_{sc}} \cdot I_{sc}^2) \quad (A.10)
\end{aligned}$$

À ces pertes doivent encore s'ajouter à toutes les pertes dues à l'interaction entre packs.

Titre : Optimisation et gestion d'énergie d'un système hybride électrique embarqué

Mots clés : Stockage de l'énergie électrique, Batteries Lithium-ion, Supercondensateurs, Hybration, Gestion fréquentielle de l'énergie, Dimensionnement, Optimisation

Résumé : Les aéronefs « plus électriques » permettent de réduire la masse à embarquer, les émissions de gaz à effet de serre et la consommation de carburant. Leur développement nécessite d'adapter leur architecture électrique et leur capacité de production et de stockage d'énergie. Les systèmes de production et de stockage doivent être bien dimensionnés pour correspondre aux besoins énergétiques du véhicule. Une hybridation électrique entre un pack constitué de batteries lithium-ion et un pack de supercondensateurs peuvent répondre, respectivement, aux demandes en énergie et en puissance de la charge. Différentes architectures électriques permettant cette hybridation sont prises en compte. Ce travail de recherche traite du dimensionnement optimal de ces systèmes de stockage à bord d'un hélicoptère. Dans cette application particulière, la masse globale de l'ensemble du système de stockage doit être minimisée. Un outil de dimensionnement optimal est développé pour atteindre cet objectif en agissant sur la fréquence de coupure d'un filtre passe-bas. A partir du profil de mission le plus contraignant en énergie et en puissance demandées, cette approche fréquentielle permet la répartition de la demande de puissance entre nos deux systèmes de stockage et, donc, leur caractérisation. Les résultats d'optimisation obtenus par architecture électrique avec la méthode du recuit simulée, sont présentés et évalués dans toute la gamme de températures. Également, une adaptation de la stratégie de gestion de l'énergie est présentée pour tenir compte de l'influence de la température sur les performances de la batterie.

Title : Optimization and energy management of an electric hybrid embedded system

Keywords : Electrical energy storage, Lithium-ion batteries, Supercapacitor, Frequency energy management, Sizing, Optimization

Abstract : The "more electric" aircraft reduces the embedded weight, greenhouse gas emissions and fuel consumption. Their development requires to adapt their electrical architecture and their energy production and storage capacity. Production and storage systems must be well dimensioned to match the vehicle energy requirements. An electric hybridization integrating a lithium-ion battery pack and a supercapacitor pack can respond to the energy and power demands of the load, respectively. Different electrical hybridization architectures will be studied. This research project deals with the optimal designs of these storage systems on board a helicopter. In this particular application, the overall mass of the entire storage tank system must be minimized. An optimal sizing tool is developed to achieve this objective by acting on the cut-off frequency of a low-pass filter. From the highest demanding mission profile in terms of energy and power, this frequency approach allows the allocation of power demand between our two storage systems and, therefore, their characterization. Optimization results obtained by electrical architecture using the simulated annealing method are presented and evaluated over the entire temperature range. Also, an adaptation of the energy management strategy is presented to evaluate the influence of temperature on battery performance.



Université de Bourgogne Franche-Comté
32, avenue de l'Observatoire
25000 Besançon