

UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE

THESE

pour obtenir le grade de

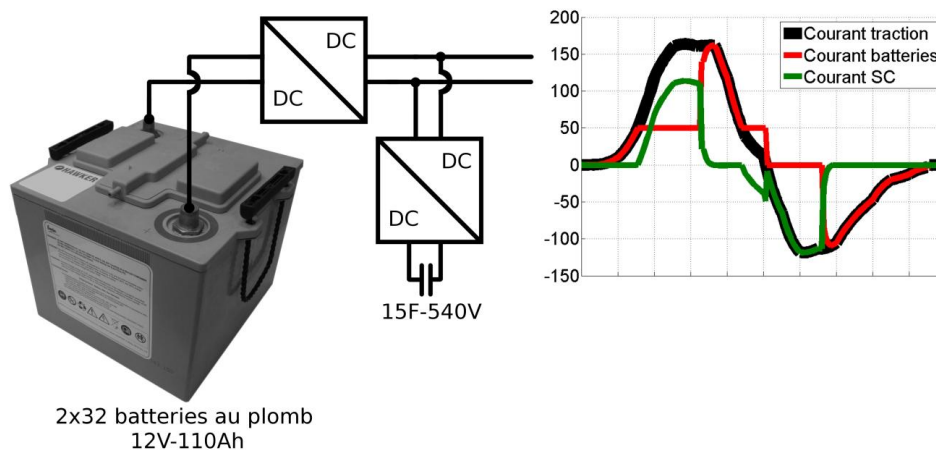
Docteur

Spécialité: Technologie de l'Information et des Systèmes (TIS)

Par

Stéphane BUTTERBACH

Stockage d'énergie électrique par association de batteries au plomb et de supercondensateurs pour véhicule lourd



Laboratoire d'Electromécanique, EA1006

Laboratoire d'accueil : Laboratoire des technologies nouvelles de l'IFSTTAR

Soutenu le 20 septembre 2012 devant le jury constitué de :

Rapporteurs :	Alain BOUSCAYROL	Professeur, L2EP, USTL, Lille
	Pascal VENET	Professeur, Ampère, Université Lyon 1
Examineurs :	Jean-Louis BOUYSSSET	Expert, Nexter Systems
	Olivier BRIAT	Maître de Conférences, Université Bordeaux 1
	Guy FRIEDRICH	Professeur, LEC, UTC, Compiègne
Directeurs :	Gérard COQUERY	Directeur de Recherche, LTN, IFSTTAR, Versailles
	Christophe FORGEZ	Professeur, LEC, UTC, Compiègne
Encadrant :	Bogdan VULTURESCU	Chargé de recherche, LTN, IFSTTAR, Versailles

Remerciements

Les travaux de recherches présentés dans ce mémoire de thèse sont le fruit d'une collaboration entre le Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN) de L'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR, né le 1 janvier 2011 de la fusion de l'INRETS et du LCPC) et le Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne (LEC) de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC).

Je tiens à remercier Monsieur Christophe FORGEZ, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne pour le temps qu'il m'a consacré et les nombreux conseils qu'il m'a prodigués, ainsi que Monsieur Gérard COQUERY, Directeur de recherche du Laboratoire des Technologies Nouvelles, et Monsieur Bogdan VULTURESCU, Chargé de recherche au Laboratoire des Technologies Nouvelles, pour m'avoir permis de réaliser cette thèse, d'avoir mis à ma disposition les moyens du laboratoire ainsi que pour leur encadrement.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur Alain BOUSCAYROL, Professeur de l'Université de Lille 1 et Monsieur Pascal VENET, Professeur à l'Université de Bordeaux 1, pour avoir accepté de rapporter sur ce travail et de m'avoir conseillé pour ce mémoire malgré leur calendrier très chargé.

Je remercie bien sûr les collègues de travail du LEC pour leur chaleureux accueil, malheureusement je n'y faisais que de trop court passage, et les collègues de travail du LTN : Manu, Abdelfatah, François, et surtout les cafés de Jean-Pierre, ainsi qu'Alexandre, Richard et Laurent.

Pour finir, je tiens à remercier ma famille qui m'a soutenue tout au long de cette thèse et tous les amis parisiens qui m'ont permis de me sortir de cette thèse, en commençant par mes colocataires, Souad, Antoine, Sullivan et Naoli, ainsi que Jonathan, Leila, Smahane, Sony, Nada, Julien, Sébastien, Sarah, Christelle ...

Résumé :

Ce travail propose une étude sur l'analyse et le dimensionnement d'un sous-système de stockage d'énergie électrique, par l'association des batteries au plomb et supercondensateurs, avec application à un véhicule urbain de type benne à ordures ménagères (véhicules électriques - poids lourds). Ces travaux rentrent donc dans la problématique très actuelle de réduction de consommation et de pollution des véhicules terrestres.

La modélisation de la benne à ordures ménagères a pris en compte le profil de mission journalière (dérivé d'ARTEMIS 400), une loi de gestion d'énergie embarquée ainsi que le dimensionnement du stockage mixte. Ces trois éléments interagissent, sont indissociables et sont indispensables à une étude du système.

Pour la mission journalière donnée nous avons constaté une diminution de la quantité d'énergie consommée d'environ 20%, grâce à une meilleure récupération de l'énergie du freinage. La loi de partage de l'énergie entre les supercondensateurs et la batterie apporte un autre avantage, l'écrêtage du courant dans la batterie - avec des conséquences bénéfiques sur les pertes et la durée de vie de la batterie. Le cyclage de la batterie au plomb mis au point au laboratoire confirme cette dernière affirmation.

Le deuxième axe important a été la modélisation fine d'une batterie au plomb pour la simulation. Cette modélisation est basée sur un modèle de Randles et des méthodes connues d'identification des paramètres, telles que la spectroscopie d'impédance et la chronoampérométrie. Le modèle tient compte de l'état de charge de la batterie et de la valeur du courant circulant dans la batterie. Le modèle de la batterie ainsi obtenu tient compte des principales non-linéarités physico-chimiques. La recharge n'a pas été occultée car elle est très importante dans la capacité du véhicule à stocker et à réutiliser l'énergie issue du freinage récupératif.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse sont encourageants et ouvrent de nombreuses perspectives.

Mots clés : Stockage mixte d'énergie électrique, modélisation/durée de vie batterie au plomb, supercondensateurs, véhicule lourd, cycle réel ARTEMIS 400.

Abstract :

This thesis presents a hybrid energy storage made of lead-acid batteries and supercapacitors for an urban waste collection electrical vehicle.

The simulation of the waste collection vehicle takes into account a real-world driving cycle (daily cycle based on Artemis 400), a specific energy management and the sizing of the hybrid storage.

Simulations show a 20% reduction of the consumed daily energy thanks to the brake recovered energy. The battery current clipping allows the reduction of battery losses with consequences on the battery lifetime. The battery cycling test bench developed in the laboratory confirmed the increase of the battery lifespan.

Half of the time was dedicated of the lead-acid battery model. This model is based on Randles equivalent circuit and takes into account the non linear relationship of the model parameters and the battery state of charge and the current. The charge acceptance was also modeled. The parameters identification is based on chronoamperometry and electrical impedance spectroscopy.

Keywords: hybrid electrical energy storage, lead-acid battery model, battery lifetime, supercapacitors, heavy duty vehicle, real-world driving cycle ARTEMIS 400

Table des matières

Introduction générale	2
1 Contexte	6
1.1 Cadre et objectifs de la thèse	6
1.2 Etat de l'art des véhicules hybrides lourds.....	8
1.2.1 Diverses sources d'énergie électrique : batterie, volant d'inertie et supercondensateurs.....	12
1.2.2 Caractéristiques de l'hybride série.....	16
1.2.3 Caractéristiques de l'hybride parallèle.....	19
1.2.4 Caractéristiques de l'hybride série-parallèle.....	21
1.2.5 La gestion d'énergie	24
1.3 Conclusions.....	26
2 Modélisation de la benne à ordures ménagères	28
2.1 Description du véhicule	28
2.1.1 Le châssis et la transmission mécanique.....	32
2.1.2 Modélisation de la chaîne de traction électrique et des auxiliaires.....	34
2.2 Le profil de mission journalière	36
2.3 Stockage d'énergie embarqué.....	39
2.3.1 Modèles supercondensateurs et batteries	39
2.3.2 Gestion de l'énergie à bord.....	40
2.3.3 Le prédimensionnement	43
2.4 Résultats de simulation - Importance de la récupération d'énergie par freinage électrique.....	50
2.5 Conclusions.....	56
3 Modélisation fine de la batterie au plomb et dimensionnement du stockage mixte	58
3.1 Introduction	58
3.1.1 La fabrication.....	59
3.1.2 Réaction chimique principale.....	61
3.1.3 Réaction chimiques secondaires	62
3.1.4 Additifs.....	65
3.1.5 La recharge d'une batterie au plomb.....	66
3.1.6 La décharge des batteries au plomb	67

3.2	Etat de l'art des modèles de batterie au plomb.....	68
3.2.1	Grandeurs électriques	68
3.2.2	Modèles basés sur les lois électrochimiques	70
3.2.3	Modèles à constantes localisées	75
3.3	Modélisation de la batterie Enersys	80
3.3.1	Caractéristiques constructeur	80
3.3.2	Les erreurs de mesure	81
3.3.3	Vérification des batteries	82
3.3.4	Méthodologie d'identification des paramètres du modèle	93
3.3.5	La validation du modèle et domaine de validité	112
3.4	Conclusions.....	115
4	Stockage mixte	116
4.1	Simulation de la BOM avec le modèle fin.....	116
4.2	Dimensionnement du stockage mixte	122
4.2.1	Dimensionnement du pack supercondensateurs du stockage mixte	123
4.2.2	Dimensionnement de la batterie du stockage mixte	128
4.3	Influence de l'hybridation des batteries au plomb sur leur durée de vie.....	132
4.3.1	Présentation du banc d'essais et de la procédure de test	132
4.3.2	Résultats (en cours) du vieillissement	141
4.4	Conclusions.....	144
5	Conclusion générale	146
6	Bibliographie	148
	Annexe 1 : Désulfatation de la UK97.....	156
	Annexe 2 : Les erreurs de mesures	158
	Annexe 3 : Profil ARTEMIS 400.....	162
	Annexe 4 : REM	163
	Annexe 5 : Comparaison entre deux stratégies de gestion du flux de puissance entre la batterie et le pack de supercondensateurs	164
	Annexe 6 : Puncher 4x2 de PVI.....	170
	Annexe 7 : Renault GR191 BOM.....	173
	Annexe 8 : Datasheet Enersys	175

Introduction générale

Un peu plus de 1 milliard d'automobiles ont été recensés en 2010 dans le monde. A lui seul, ce nombre rend compte de l'importance de l'automobile dans le développement économique de nos sociétés, mais également de l'incidence de ce mode de transport sur la demande énergétique et de l'augmentation de la pollution.

Conscients de ces faiblesses, pouvoirs publics et constructeurs automobiles travaillent de concert en vue d'apporter des solutions alternatives aux véhicules thermiques, afin de rendre ceux-ci plus économes et moins polluants. C'est ainsi que depuis plus d'une décennie, plusieurs solutions commerciales ont vu le jour, allant du véhicule hybride (Toyota Prius, 1998), en passant par les micro-hybrides au milieu des années 2000 (systèmes Valeo, Bosch), jusqu'à l'électrification complète des chaînes de traction au début de cette décennie (Leaf de Nissan en 2011, Ion de PSA, Zoé et Fluence de Renault en 2012, Blue Car de Bolloré,...). Cette chronologie montre clairement une intensification des efforts portés sur l'électrification des chaînes de traction. Bien que le trajet quotidien moyen des français ne dépasse pas 40 km, [CGDD, 2010] et [INSEE, 2010], la faible autonomie des véhicules électriques, le réseau urbain de recharge des batteries qui doit être développé et la durée de la recharge des batteries ainsi que leur durée de vie, sont des freins au développement du marché de l'automobile électrique. En attendant la rupture technologique au niveau de la batterie électrique, l'hybridation des sources d'énergie semble pour le moment une solution d'avenir qui permet de répondre à un certain nombre de ces problèmes. L'objectif de cette thèse est d'étudier un stockage mixte, fait par l'association des batteries avec des supercondensateurs.

Bien que l'hybridation et l'électrification des chaînes de traction aient pour vocation, à terme, de s'adresser au plus grand nombre d'automobilistes, aujourd'hui, ces nouveaux modes de traction s'adressent bien souvent à des marchés de niche ou de flottes captives, par exemple « l'Autolib » à Paris. Cela permet d'une part, un dimensionnement du véhicule adapté à des utilisations bien définies, et d'autre part de contrôler l'usage qui est fait de ces véhicules. Le domaine des poids lourds fait partie de ces marchés ciblés. L'application visée dans notre étude porte sur un véhicule de type poids lourds, une benne à ordures ménagères. Ces travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet ANR-VTT 2008-2012 « ARCHYBALD » – Architecture Hybride Adaptée aux véhicules Lourds à forte Disponibilité. Le projet ARCHYBALD comprend deux applications, une militaire et une autre civile. Pour des raisons de confidentialité, seule la partie concernant l'application civile, la benne à ordures ménagères, sera développée dans ce document.

Notre étude inclut des approches focalisées sur les contraintes d'usage, ainsi nous avons utilisé un profil de mission réel d'une benne à ordures afin d'extraire les contraintes électriques sur le stockage mixte. Indissociablement liés à cette opération sont le dimensionnement du stockage et la loi de partage des flux d'énergie entre les batteries et les supercondensateurs.

Nous avons choisi d'implémenter une loi de gestion très simple, basée sur la limitation du courant dans la batterie. Les supercondensateurs assistent les batteries en fournissant/absorbant le reste de l'énergie demandée par la charge. L'énergie stockée dans les supercondensateurs est contrôlée par la régulation de leur tension. Nous sommes conscients que cette loi ne constitue pas un optimum de l'utilisation du stockage mixte, mais la facilité de son implémentation en temps réel

constitue un atout majeur. D'autres études scientifiques proposent des lois optimales si le profil de mission est entièrement connu, mais la plupart des lois de gestion des sources hybrides sont des lois heuristiques. Comme dans notre cas, ces lois heuristiques tendent de rendre le courant fourni par la batterie le plus lisse possible et de transférer aux supercondensateurs la dynamique la plus importante de la charge, les moyens utilisés étant bien évidemment différents : filtrage de la puissance de la charge, méthode du thermostat, limitation du courant fourni par la batterie en fonction de l'accélération du véhicule

Malgré sa simplicité, la loi de gestion remplit sa fonction principale, celle de faire des économies d'énergie. Elle nous a permis également de déduire une procédure de dimensionnement du stockage mixte. Dans cette procédure nous utilisons comme indicateur principalement le courant efficace de la batterie. Ce courant est un indicateur des sollicitations subies par la batterie, et à travers lui, la durée de vie des batteries peut être prise en compte dans le dimensionnement initial. Dans notre étude, nous avons également mis en évidence d'autres éléments très importants dans le dimensionnement du stockage mixte, comme la capacité de récupération de l'énergie lors de freinages et la capacité des sources à stocker l'énergie récupérée.

Afin de prendre en compte la capacité de stockage d'une batterie nous avons modélisé une batterie au plomb, en fonction du courant et de l'état de charge. Les méthodes utilisées sont assez classiques, développées récemment (comme la chronoampérométrie). Le modèle choisi, ainsi que la modélisation de la décharge et de la charge, constituent des originalités de notre démarche. Ce modèle fin de la batterie au plomb, nous a permis notamment de mettre en évidence une économie substantielle d'énergie sur une journée de travail de la benne. Il faut remarquer que la quasi-majorité des études scientifiques se résument à l'étude sur un seul cycle normalisé standard non représentatif de l'usage, à l'opposé de notre étude qui est basé sur un profil de mission journalier lui-même basé sur la répétition d'un cycle d'usage réel.

L'étude de l'association des batteries et supercondensateurs ne serait complète sans une analyse de l'influence des différents choix sur la durée de vie de la batterie, le maillon faible du stockage, en terme de cycle de vie. Habituellement, les études de vieillissement d'accumulateurs consistent à tester les accumulateurs suivant des cycles d'essais standardisés, paramétrés en fonction de sollicitations tels que l'intensité, les variations d'état de charge, la température, ... Cette méthode permet de cartographier l'incidence de ces différents facteurs sur le vieillissement, mais vu la multiplicité des sollicitations à tester, il est nécessaire de mobiliser un grand nombre de voies d'essais sur une longue durée. Des courbes de durée de vie des accumulateurs sont bien établies par les constructeurs de batteries. Néanmoins ces courbes sont indexées par rapport à un nombre de cycles de charge et de décharge à courant constant et à température donnée. Il est donc difficile d'évaluer à partir de ces courbes, la durée de vie d'un accumulateur pour un cycle d'usage quelconque. L'approche proposée dans ce mémoire est radicalement différente. Nous souhaitons démontrer l'intérêt d'hybrider le système de stockage principal (l'accumulateur) avec une source auxiliaire (des supercondensateurs) dans le but d'optimiser la durée de vie des accumulateurs. En conséquence, nous avons choisi de mener une campagne d'essais de vieillissement accéléré (sous fortes contraintes en courant) pour la comparaison directe de la perte de capacité d'un pack soumis à un profil de courant issu de la simulation de la benne alimentée par la batterie seule, avec un autre pack de batterie soumis lui à un profil de courant issu de la simulation de la même benne alimentée cette-fois par le stockage mixte.

En conclusion, nous pouvons affirmer que l'hybridation d'une batterie au plomb avec des supercondensateurs apporte plusieurs avantages. D'abord, le courant efficace des batteries diminue ce qui conduit à la diminution des pertes et de l'échauffement. De plus, si la source de puissance (les supercondensateurs) est plus importante, une économie d'énergie est tout à fait envisageable surtout si la batterie doit travailler à des états de charge élevée). Cette affirmation est prouvée par la comparaison d'un véhicule électrique muni d'une batterie au plomb avec le même véhicule alimenté par le stockage mixte. Cette économie d'énergie est d'autant plus importante que la récupération d'énergie et l'acceptabilité des sources est forte. Un dernier avantage de l'hybridation est l'augmentation de la durée de vie des batteries au plomb.

Le premier chapitre décrit le contexte de la thèse dans le cadre du projet ARCHYBALD et le cahier des charges. Nous dressons un état de l'art des véhicules hybrides lourds (des applications industrielles du domaine routier et ferroviaire) et des lois de gestion d'énergie des sources et des véhicules hybrides.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la modélisation d'une benne à ordures ménagères alimentée par un stockage mixte de batteries au plomb et supercondensateurs. Des modèles simples de la chaîne de traction électrique et du stockage mixte y sont détaillés. Une méthode de prédimensionnement des supercondensateurs et des batteries est présentée tout en tenant compte du profil de mission et de la gestion d'énergie à bord du véhicule. Dans le paragraphe final nous mettons en évidence l'importance dans le dimensionnement du stockage mixte du freinage électrique ainsi que l'étroite liaison entre le stockage d'énergie, le profil de mission et la loi de gestion.

Dans le chapitre 3, nous commençons par un état de l'art des modèles de batteries puis nous décrivons un modèle fin de la batterie au plomb utilisée. Notre modèle est complexe car il tient compte de l'état de charge et de la valeur du courant mais également de l'acceptabilité en recharge de la batterie au plomb.

Le chapitre 4 présente les résultats de simulation de la benne à ordures ménagères en intégrant le modèle fin de la batterie au plomb développé précédemment. Une analyse du dimensionnement final du stockage est également menée. La deuxième partie du chapitre est consacrée aux essais comparatifs de vieillissement de deux packs de batteries soumises aux mêmes contraintes énergétiques mais avec des sollicitations en courant différentes.

1 Contexte

1.1 Cadre et objectifs de la thèse

La thèse s'est déroulée dans le cadre du projet ARCHYBALD (ARChitecture HYbride Adaptée aux véhicules Lourds à forte Disponibilité). Le projet a été principalement financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et le programme PREDIT « véhicules propres et économes » et abondé par le pôle de compétitivité « MOV'EO ». Il a été qualifié comme « projet de pôle » par « MOV'EO » et également labélisé par MEGEVH. Il s'est étalé sur 4 ans (3 ans avec avenant de 1 an, soit de janvier 2008 jusqu'à fin décembre 2011).

Pour l'INRETS (nouvellement IFSTTAR), il a été parmi les tous premiers projets à financer intégralement une thèse de doctorat. Comme nous avons donc dû faire face aux contraintes scientifiques et contractuelles à la fois, nous présentons le cahier des charges de la thèse dans le cadre plus large du contexte scientifique du projet.

L'objectif du projet est de proposer une chaîne de traction hybride s'articulant autour d'un double train épicycloïdal et d'un stockage mixte d'énergie électrique, pour un véhicule utilitaire de plus de 20 tonnes. Ce type de véhicule correspond à plusieurs fonctionnalités, qu'elles soient civiles (desserte en milieu urbain, transport de personnes, etc...) ou militaire (transport de troupes).

Une chaîne de traction hybride série-parallèle, associée à des dispositifs de stockage d'énergie capacitifs (supercondensateurs) pour la puissance et électrochimique (batteries) pour la partie énergie, s'est imposée dès le début du projet comme étant la plus appropriée pour la réduction de la consommation et des émissions polluantes. Evidemment, les fonctions et les performances dynamiques du véhicule, ainsi que sa disponibilité ont été privilégiées.

Le projet étant assez ambitieux, les partenaires¹ se sont partagés les tâches.

- Au laboratoire FEMTO-ST de l'Université de Franche-Comté ont été étudiées les machines électriques,
- Nexter Systems a apporté son expérience d'intégrateur mais aussi il s'est impliqué dans la mécanique de la transmission de la puissance, mettant en jeu son brevet de double train épicycloïdal,
- Batscap a fourni les modules de supercondensateurs,
- Le laboratoire L2EP de l'Université Lille I a modélisé et simulé le véhicule, et a conçu la gestion énergétique et la commande à partir des modèles fournis par les autres partenaires.
- Le Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN) de l'IFSTTAR a contribué à la définition du cahier des charges du stockage d'énergie mixte électrique et a étudié l'association des batteries avec les supercondensateurs.

¹ Les laboratoires publics et Nexter Systems font partie du réseau MEGEVH (modélisation énergétique et gestion d'énergie de véhicules hybrides)

Parmi les fonctionnalités du véhicule lourd imposées par le cahier de charge, nous pouvons noter :

- Le start/stop - l'alternateur maintient le moteur thermique "en veille" lors des arrêts véhicule,
- le freinage récupératif - la quantité d'énergie récupérée et stockée doit être optimisée,
- le fonctionnement en tout électrique à basse vitesse (10km/h en mode furtif pour la version militaire et un mode silencieux pour la version civile) - le moteur thermique n'étant pas à son meilleur rendement dans les bas régimes, il est intéressant que la machine électrique ait la puissance suffisante pour assurer la propulsion du véhicule à basse vitesse. En cas de défaillance du moteur thermique, la machine électrique seule peut également assurer un mode de propulsion secours,
- Assistance du moteur thermique afin d'éviter les brusques changements de régime, la machine électrique doit disposer de la puissance et de l'énergie permettant de lisser les transitoires du moteur thermique, mais aussi de pouvoir le démarrer (boost),
- La recharge du véhicule par le réseau électrique,
- La réduction des émissions sonores - La capacité du système à fonctionner avec la machine électrique seule permet de réduire les nuisances sonores de véhicules lourds souvent bruyants. Nous pouvons ainsi imaginer d'imposer, dans certaines zones urbaines, ou à proximité de zones d'habitation, aux véhicules lourds de fonctionner en mode silencieux. Dans le cas de véhicules civils, cette fonction leur confère une réduction des nuisances sonores en milieu urbain. Dans le cas de véhicules militaires, cette fonction leur confère en outre une plus grande discrétion face à l'ennemi.
- Alimentation des auxiliaires du véhicule par le réseau électrique.

Les missions des véhicules visés étant très proches (transport de troupe pour le véhicule militaire - desserte urbaine, benne à ordures ménagères pour le véhicule civil), les puissances visées aussi (environ 300kW), nous avons pensé initialement à une forte similitude. Mais au fur et à mesure de l'avancement du projet, nous nous sommes aperçus que certaines performances et surtout la disponibilité du véhicule étaient totalement différentes. Il a alors fallu étudier les deux véhicules séparément. A l'IFSTTAR, nous nous sommes focalisés sur le véhicule civil, la benne à ordures ménagères (BOM).

La principale contrainte pour la définition du cahier des charges du stockage d'énergie électrique embarquée a été le roulage en basse vitesse en mode tout électrique. Cette fonctionnalité du cahier des charges est dimensionnante pour le stockage, une fois la gestion multi-source figée. La gestion du stockage mixte, multi-source, (des batteries pour fournir l'énergie nécessaire à la traction et aux auxiliaires, des supercondensateurs pour fournir et récupérer les transitoires de puissance) a été dès le début du projet souligné comme l'un des points innovants d'ARCHYBALD.

Par conséquent, l'objectif principal de la thèse a été l'étude de l'association des batteries et des supercondensateurs pour une benne à ordures ménagères pouvant fonctionner en mode tout électrique. Le choix de la technologie de la batterie a été la batterie au plomb, pour son coût, sa très bonne recyclabilité mais aussi par l'intérêt porté par un des partenaires du projet vis à vis d'une certaine batterie au plomb.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter un état de l'art des véhicules hybrides lourds. Les différents composants d'une source mixte sont inventoriés dans la deuxième partie du chapitre. L'épineuse question du partage des flux d'énergie entre ces différentes sources fait aussi l'objet d'un état de l'art.

1.2 Etat de l'art des véhicules hybrides lourds

La présence de plusieurs sources d'énergie à bord des véhicules ne date pas d'hier. Nous allons donner un aperçu de quelques réalisations industrielles dans ce chapitre en se focalisant sur les véhicules lourds. Nous n'allons pas présenter la multitude des prototypes, souvent à l'échelle réduite, qui font l'objet de très nombreuses publications scientifiques.

Dans le domaine routier, par exemple, les autobus hybrides MAN utilisent depuis les années 70 un moteur à combustion interne et un stockage : gyroscopique (1972) ou hydraulique (1972), mécanique - le volant d'inertie (1987) ou électrique - les batteries NiMH (2000) ou les supercondensateurs (2001). Des projets d'autobus avec une pile à combustible et des batteries NiMH ont également été proposés [MAN, 2010]. Aujourd'hui, le marché des bus hybrides est quasiment partagé par BAE et Allison. Un autre véhicule lourd, une benne à ordures ménagères bi-mode, le Puncher de PVI, commercialisé au début des années 2000, est doté d'un moteur thermique et de batterie (au plomb ou au lithium).

Dans le domaine du ferroviaire, les applications sont plus récentes mais aussi diverses. Nous pouvons mentionner le NE@Train (New Energy Train [Fujii, 2004]) produit par la compagnie japonaise Tokyo Car Co en 2003 (exploité par la JR-EAST [RGCF, 2011]), un train hybride série doté d'un moteur thermique et de batteries au lithium-ion. Toshiba a industrialisé en 2010 ce concept sous l'appellation « HD-300 hybrid locomotive » [Toshiba, 2010]. D'autres exemples ferroviaires sont la locomotive « Green Goat » (2004), une locomotive BNSF à pile à combustible et batteries au plomb [Miller, 2007], un hybride série qui utilise des batteries au plomb et un moteur thermique, la toute récente flotte de 10 hybrides « série-parallèle » de la JR-EAST (2010) [Economist, 2010], [RGCF, 2011], les 5 locomotives de manœuvre BR202 d'Alstom loués par l'opérateur MEG [RGCF, 2011], des hybrides séries aux batteries NiCd, la plateforme d'expérimentation « Plathee » (un hybride série avec un moteur thermique, des batteries NiCd et supercondensateurs) [Thiounn-Germeur, 2011], [RGCF, 2012], la première automotrice bi-mode bi-tension de Bombardier, l'AGC BiBi (2004). Bombardier a installé l'Energy Saver Mitrac (un stockage à supercondensateurs [Mitrac, 2009]) sur le tramway de Mannheim [Frohlich, 2010]. Siemens, Alstom et CAF ont déjà expérimenté des tramways qui utilisent un stockage d'énergie en plus de l'alimentation par caténaire : le tramway de Nice (batterie NiMH), Sistras à Lisbonne (supercondensateurs ou batteries NiMH proposé par Siemens), le projet STEEM à Paris [Moskowitz, 2010], le tramway de Rotterdam (volant d'inertie) et le tramway de Séville [Caf, 2010]. Le constructeur suisse Hess produit des trolleybus qui ont comme source secondaire d'énergie des supercondensateurs [Hess, 2007].

Il existe des prototypes et des petites séries d'autobus et de trains utilisant une pile à combustible comme source principale. Parmi les autobus, nous pouvons citer une flotte d'autobus hybrides (pile à combustible avec des batteries lithium-ion) les Citaro FuelCELL Hybrids

[Mercedes, 2012], fabriqué par Daimler [Daimler, 2011]. Dans le domaine ferroviaire, la plateforme d'expérimentation « Plathee » a été temporairement utilisée pour un essai avec une pile à combustible de 80kW à la place du groupe électrogène.

Parmi les exemples énumérés, nous pouvons distinguer les véhicules bi-modes des véhicules hybrides. Les **véhicules bi-modes** ne peuvent pas combiner les différents flux de puissance, ils utilisent les différentes sources d'énergie de façon alternative. Nous appelons **véhicules hybrides**, les véhicules qui peuvent utiliser simultanément plusieurs sources d'énergie afin d'optimiser le fonctionnement de chaque type de source. Notre étude porte sur l'association des sources pour former une source hybride (ou mixte). Nous remarquons parmi les véhicules du marché ou dans les prototypes énoncés, l'utilisation d'une source principale, le moteur thermique ou la caténaire - rarement une pile à combustible ou une batterie², et l'utilisation d'une deuxième source plus rapide, plus dynamique. Cette deuxième source peut être : des batteries, des supercondensateurs, une source hydraulique³ ou un volant d'inertie : les différentes topologies pour l'association des deux sources sont résumées dans [Khaligh, 2010].

Concernant le développement de la transmission de la puissance vers les roues, d'après [Chan, 2007] trois catégories de véhicule hybride peuvent être distinguées :

- Hybride série – dans un hybride série, la transmission de la puissance des sources vers les machines électriques de traction se fait exclusivement par un bus électrique (Figure 6). Il s'agit de l'architecture la plus souvent rencontrée dans les véhicules hybrides lourds.
- Hybride parallèle – dans cette architecture il y a toujours un moteur thermique en liaison mécanique avec les roues. A ce flux de puissance s'y ajoute la puissance d'une chaîne de traction électrique. La mise en commun des puissances se fait par un dispositif mécanique (type train épicycloïdal) (Figure 9).
- Hybride série-parallèle – il s'agit d'une combinaison plus complexe des deux topologies précédentes. Habituellement il y a une mise en commun des puissances des deux machines électriques et du moteur thermique par un dispositif mécanique, ainsi que le partage de la source électrique par les deux machines électriques, illustrée sur la Figure 11 [Emadi, 2005].

Dans [Chau, 2002] y sont répertoriés d'autres types d'architectures, plus complexes, mais qui ne font plus aujourd'hui l'unanimité. Toutes ces architectures sont illustrées sur la Figure 1.

Une autre méthode de classification est proposée par [Friedman, 2003] qui prend en compte le taux d'hybridation (Figure 2). Ce taux représente le rapport entre la puissance électrique et la puissance totale de traction.

² General Electric a équipé un bus en 2011 avec une batterie hybride, faite de l'association des cellules de Lithium-ion (pour la puissance massique) et des cellules de batterie au sodium [ElectroniquesS, 2011].

³ Notre étude ne portera pas sur l'association d'une source hydraulique avec une autre de nature quelconque, car pour l'instant il n'y a pas d'application issue d'études antérieures dans ce domaine.

Lors des phases d'arrêt, un véhicule de type « mild hybrid » (taux d'hybridation faible) arrête totalement son moteur thermique et le redémarre lors de l'appui sur l'accélérateur (stop&start), peut récupérer l'énergie cinétique lors du freinage (freinage récupératif ou freinage électrique) et intègre un moteur thermique allégé (downsizing). Le « full hybrid » intègre en plus un mode tout électrique en basse vitesse sur une courte distance. Le « plug-in hybrid » peut, quant à lui, circuler sur une grande distance en mode 100% électrique et le moteur thermique ne sert qu'à augmenter l'autonomie du véhicule. Le « range extender » est un véhicule électrique avec un moteur thermique pour augmenter l'autonomie du véhicule. Les concessionnaires vendent sous le nom de « micro hybrid » un véhicule thermique qui a un mode stop-start mais ils n'a pas le freinage électrique donc ce véhicule n'est en réalité pas une voiture hybride en tant que telle.

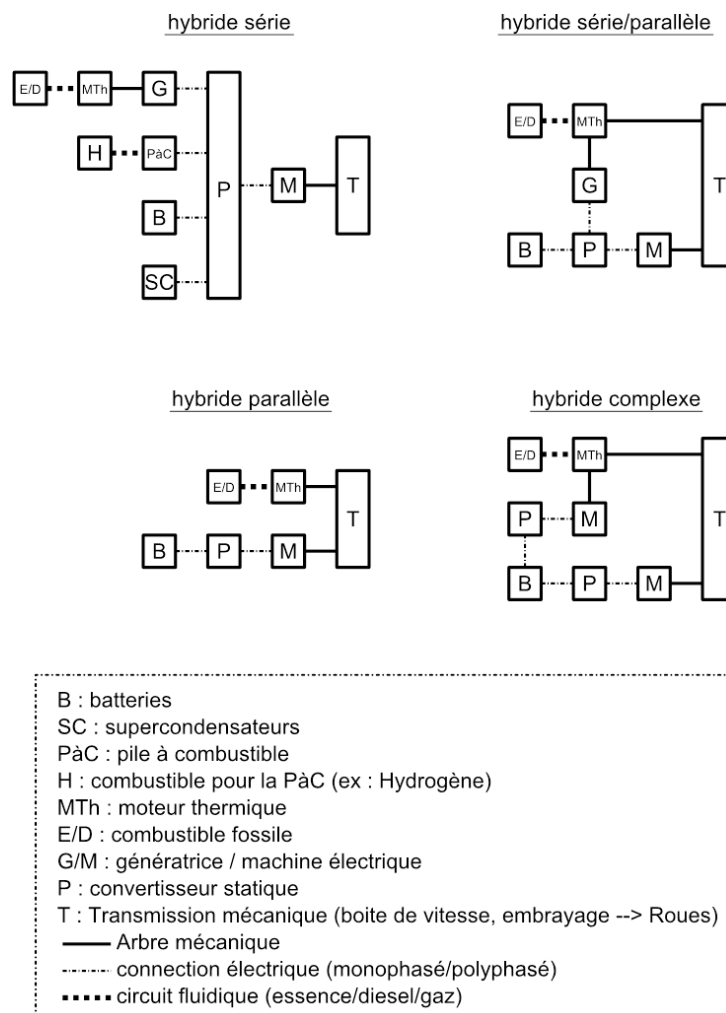


Figure 1 : Classification des hybrides selon [Chau, 2002]

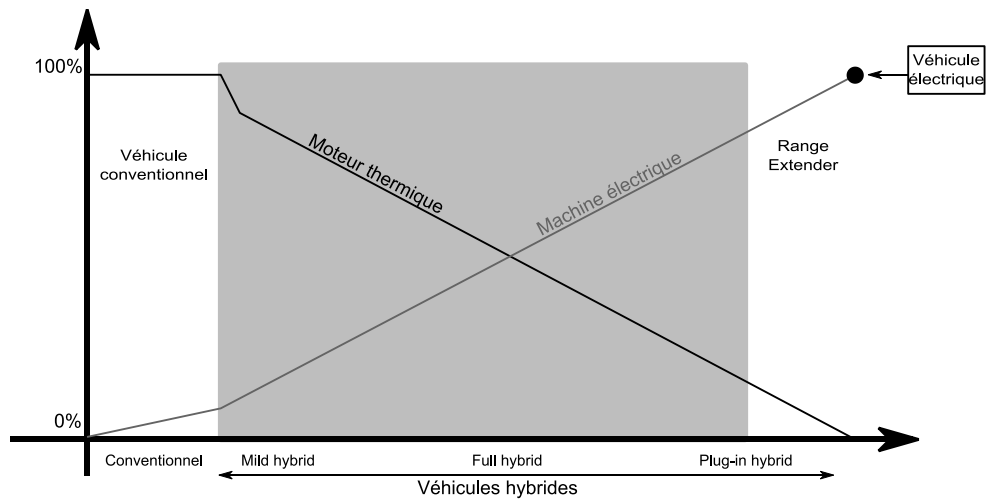


Figure 2 : Le taux d'hybridation [Friedman, 2003]

Avant de détailler plus les différentes architectures hybrides, nous allons donner un bref aperçu des quelques sources d'énergie électrique embarquées.

1.2.1 Diverses sources d'énergie électrique : batterie, volant d'inertie et supercondensateurs

Des sources comme la Pile à Combustible⁴ (PàC), le volant d'inertie, les batteries et les supercondensateurs peuvent apparaître dans les architectures hybrides. Un aperçu des caractéristiques globales des sources les plus courantes est donné dans la suite.

Les batteries électriques stockent l'énergie électrique sous forme électrochimique. Leurs avantages sont le stockage d'énergie, la quasi absence de maintenance et l'intégration (modulaire, robustesse et pour certaines, la sécurité d'utilisation). Les points faibles sont la température de fonctionnement, la durée de vie et la faible densité d'énergie comparée au réservoir de carburant d'un moteur thermique.



a) Batterie Li-ion polymère de Nissan



b) Batterie NiMH de la Toyota Prius



c) Batterie au plomb de Hawker, l'Armasafe



d) Batterie NiCD de Saft, type MRX

Figure 3 : Différents types de batteries

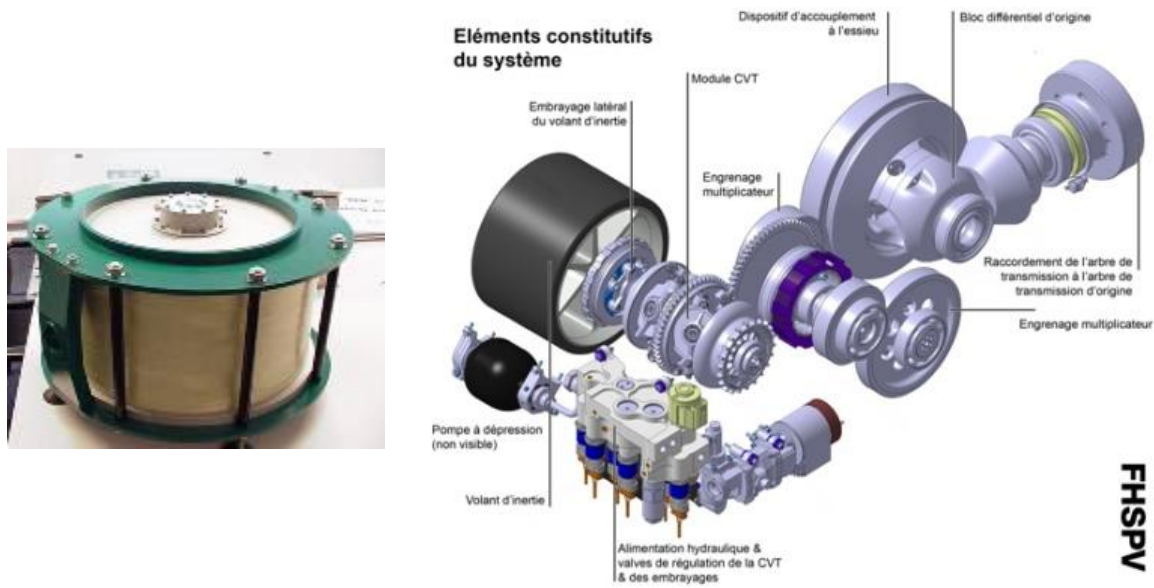
⁴ Nous n'allons pas présenter les piles à combustibles pour plusieurs raisons. La première concerne les applications, il y a très peu de véhicules hybrides lourds à piles à combustibles. Il s'agit souvent de prototypes car la durée de vie d'une pile à combustible et les puissances disponibles actuellement sur le marché ne sont pas suffisantes. Une autre raison est la nature de cette source d'énergie et sa dynamique. Comme le moteur thermique, la pile à combustible est une source d'énergie qui stocke le carburant à part, d'où une grande autonomie. La dynamique de ces sources est beaucoup plus lente que les autres sources que nous avons choisies de présenter de manière plus détaillée. La troisième raison est liée à l'avenir [Mierlo, 2006] de « hydrogen economy », prometteuse mais à long terme et ayant encore des difficultés techniques à surmonter.

Technologie	U cellule unitaire (V)	Durée de vie (cycle)	Température d'utilisation (°C)	Energie spécifique (Wh/kg)	Energie spécifique (Wh/l)	Puissance crête (W/kg)	Cout €/kWh	Rendement faradique
Pb/PbO ₂	2,1	500 <i>500</i> 700	-20°C à 60°C	30 à 50 <i>25 à 40</i> 35	75 à 120	700	151 <i>50 ÷ 150</i> 8 ÷ 10	82.5%
Ni-Cd	1,2	2000 <i>1350</i> 2000	-40°C à 60°C	45 à 80 <i>50 à 60</i> 40	80 à 150	200	720	72.5%
Ni-MH	1,2	500 à 1000 <i>1350</i> 2000	-20°C à 60°C	60 à 110 <i>60 à 70</i> 55	220 à 330	900	666 <i>700</i> 70 à 100	70%
Ni-Zn	1,65	> 1000	-20°C à 70°C	65 à 80	120 à 140	700		
Ni-Zn puissance	1,65	> 1000	-20°C à 70°C	65 à 80	120 à 140	1000		
Li-ion	1,8V – 4,2V Selon technologie	1000 <i>1000</i> 3000	-20°C à 60°C	150 à 200 <i>60 à 125</i> 110	220 à 330	1500	860 <i>700 à 1500</i> 70 à 300	90%
Li-Polymère	3,7	300 ~ 10 ans	0°C à 60°C	150 à 200	220 à 330	250		

Tableau 1: Le stockage électrochimique selon différentes sources d'information; en police normale [Ademe_SE, 2005], en italique [Subat, 2006] et en gras [Eurobat, 2012]

La différence entre les technologies de batteries est le couple d'oxydoréduction utilisé. Les batteries rencontrées classiquement sont les batteries au plomb, NiCD, NIMH et la famille des batteries Li-ion. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau précédent. Evidemment, certaines valeurs sont indicatives (comme la durée de vie) et il faut les prendre avec précautions car elles varient selon la source d'information.

Les volants d'inertie stockent l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique. Ils sont soit totalement mécanique avec un système d'embrayage et un multiplicateur de vitesse (Figure 4b) soit le système est composé d'un volant entraîné par une machine électrique (Figure 4a). Les points positifs sont la durée de vie des éléments sous vide et la puissance massique. La sécurité est le problème majeur de cette technologie car le rotor tourne à très haute vitesse (jusqu'à 80 000tr/min).



a) Volant d'inertie du tramway Citadis [Alstom, 2007]

b) Volant d'inertie 100% mécanique de Jaguar

Figure 4 : Les volants d'inertie

Quelques exemples d'application de volant d'inertie dans les véhicules lourds (sauf le UPS de Vycon qui est une application statique), sont présentés dans le Tableau 2 :

	Puissance (kW)	Energie (Wh)	Vitesse (tr/min)	Masse (kg)	Année
KERS (Flybrid Kinetic Energy Recovery System) [Flybridsystems, 2012]	60	111	60 000	25	2009
Flybus [Fuller, 2011]	60 (100 max)		60 000	10	2011
VYCON VDC (UPS) [VYCON, 2012]	251	833	36 000	700	2009

Tableau 2 : Exemples de volants d'inertie

Les supercondensateurs stockent l'énergie sous forme électrostatique. Ils sont des systèmes de stockage d'énergie de faible densité d'énergie mais d'une densité de puissance importante. Par conséquent, ils sont utilisés dans les phases transitoires pour fournir les pics de puissance demandés, afin de réduire les sollicitations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie (moteur thermique, batteries ou pile à combustible).



a) Modules de Maxwell



b) Élément unitaire d'Esma



c) Module de Batscap



d) Élément unitaire de Nesscap

Figure 5 : Exemple de supercondensateurs et leurs modules

Il existe deux familles de supercondensateurs qui se distinguent par le type d'électrolyte utilisé : organique ou aqueux. Néanmoins les deux familles utilisent des électrodes en charbon actif. L'électrolyte à base organique accepte des tensions maximales de l'ordre de 2,7V contre seulement 1V pour les autres, en contrepartie, la capacité massique des supercondensateurs de type organique est plus faible que pour la deuxième technologie. Il est à noter que dans le tableau ci-dessous, le supercondensateur Esma* est constitué de deux supercondensateurs en série.

Constructeur	Capacité / Tension nominale (F) / (V)	Poids (kg)	Energie massique (Wh/kg)	Puissance massique (W/kg)	Type
Maxwell	3 000 / 2,7V	0,51	6	12 000	Organique
Batscap	2 600 / 2,7V	0,5	5,3	20 000	Organique
Esma	80 000 / 1,7V *	2,8	9	500	Aqueuse
Nesscap	3 000 / 2,7V	0,53	5,73	11 000	Organique

Tableau 3 Données constructeur de divers supercondensateurs

Après avoir brièvement présenté les différentes sources d'énergie, nous allons présenter les principales caractéristiques des véhicules hybrides.

1.2.2 Caractéristiques de l'hybride série

L'hybride série (Figure 6) est l'architecture hybride la plus simple et la plus proche d'un véhicule 100% électrique. Les sources d'énergie mettent en commun les flux de puissance par le biais du bus électrique haute tension, par le biais ou non d'un convertisseur. La transmission est donc électrique et constitue un avantage par rapport aux autres architectures car étant très flexible. Sur le marché des véhicules hybrides lourds, c'est l'architecture la plus rencontrée.

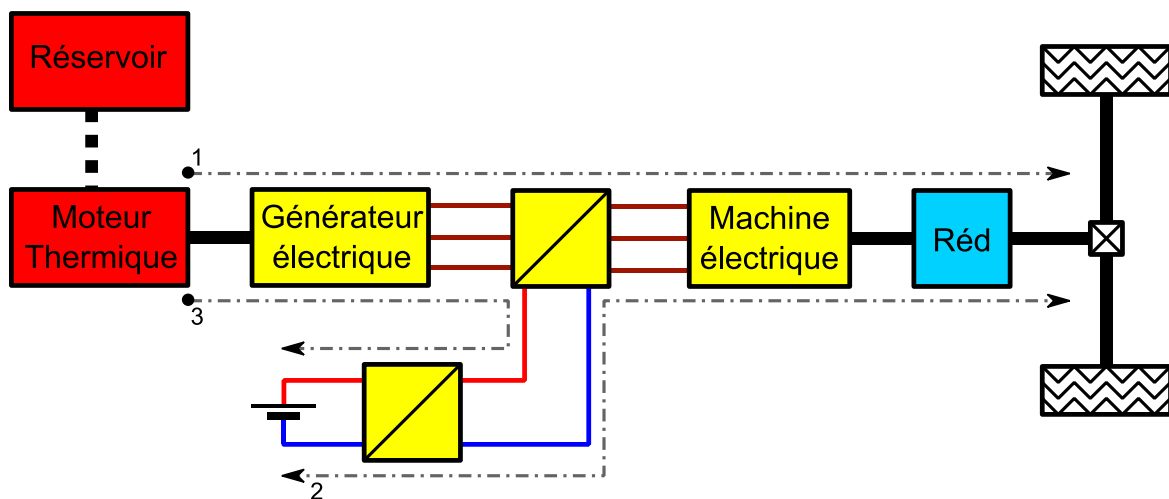


Figure 6 : Chaîne de traction hybride série

Pour une association motorisation thermique - batteries, le fonctionnement d'un véhicule hybride série pourrait se résumer ainsi :

Lors de la phase d'accélération, la puissance électrique est fournie par le moteur thermique et par les batteries (Figure 6, Flux 1 + 2). Lors de la phase de freinage, l'énergie récupérée va

recharger les batteries (Figure 6, Flux 2) et l'autre partie de l'énergie du freinage sera dissipée par les freins mécaniques. En fonction de l'autonomie des batteries installées, la stratégie de gestion d'énergie de la batterie peut être de maintenir le niveau de charge de celle-ci à l'aide du moteur thermique (« charge sustaining ») (Figure 6, Flux 3) ou de décharger lentement la batterie au cours de la journée et de la recharger à l'aide du réseau électrique (« charge depletion »). La capacité de la batterie peut permettre de réduire la taille du moteur thermique (« downsizing ») si elle permet de fournir le complément d'énergie nécessaire à la traction.

Les points forts de cette architecture sont la simplification de la chaîne de transmission mécanique et la grande simplification de la gestion d'énergie du véhicule et le possible découplage de fonctionnement entre le véhicule et le moteur thermique. Les points faibles de la chaîne de traction série sont la puissance des trois machines (1 génératrice, 1 machine électrique et 1 moteur thermique) sensiblement identiques (sauf pour le « downsizing ») et aussi la cascade d'éléments qui diminue le rendement global : l'énergie du moteur thermique transite par les machines électriques, les batteries et les convertisseurs d'où un plus faible rendement global que pour les autres topologies [Scordia, 2004].

Plusieurs solutions industrialisées existent déjà, utilisant soit des batteries au plomb soit des supercondensateurs pour le stockage. Dans le tableau ci-dessous, un échantillon de ces véhicules (autobus et benne à ordures ménagères) est présenté.

Nom du véhicule	Puissance moteur thermique (kW)	Puissance machine électrique (kW)	Stockage d'énergie	Année de fabrication
Transportation Techniques (Transteq)	51	300	26 batteries au plomb	1998
BAE/Orion VII	198	202	46 Batteries au plomb	2005
BAE/Orion VII	172	179	Batteries au plomb	1998
ISE Research/New Flyer	220	300	288 SC	2005
ISE Research/New Flyer	220		Plomb / SC	2005
Scania	198	150	SC de 400Wh-125V	2009
MAN Lion's City	184	2x75	SC	2010

Tableau 4 : Exemples de véhicules hybrides série (données constructeurs et [EERE, 2005])

Notons que les puissances de traction sont de l'ordre de 200kW pour tous les types des véhicules. Un exemple de « downsizing » est le véhicule « Transteq » qui a une puissance thermique de 51kW (Figure 7).

Néanmoins, certaines études [Offer, 2010] estiment qu'un véhicule hybride série avec pile à combustible et batteries a plus d'avenir qu'un véhicule électrique pur à moyen terme. Pour cette

raison, nous présentons dans la suite dans le Tableau 5 quelques exemples de véhicules lourds à pile à combustible, ainsi que l'un des plus représentatifs, le Citaro de Mercedes.



Figure 7 : Le Transtek

Nom du véhicule	Puissance pile à combustible (kW)	Puissance machine électrique (kW)	Stockage d'énergie (batteries)	Année de fabrication
Mercedes-Benz Citaro	120kW	120kW (160kW max)	27kWh (Lithium-ion)	2010
Vanhool	120kW	2 x 85kW	17,3kWh	2008

Tableau 5 : Exemple d'autobus avec une pile à combustible (données constructeurs et [EERE, 2005])



Figure 8 : Mercedes-Benz Citaro

1.2.3 Caractéristiques de l'hybride parallèle

L'hybride parallèle est une évolution de l'architecture des véhicules conventionnels. Le schéma de principe est illustré sur la figure suivante :

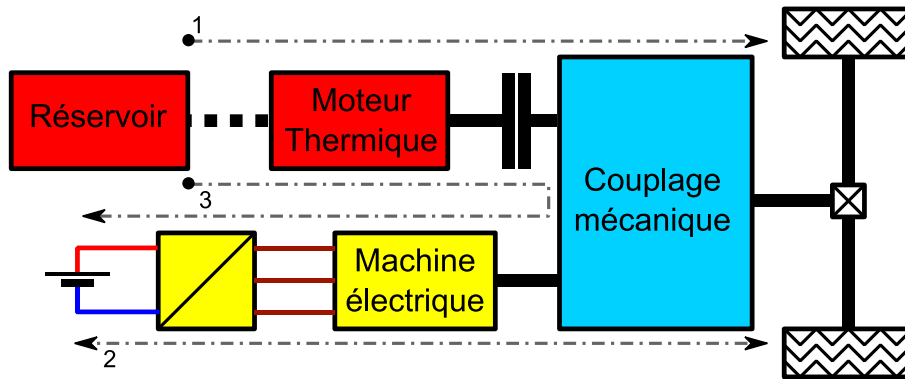


Figure 9 : Chaîne de traction hybride parallèle

Le moteur thermique, interfacé habituellement par un embrayage, est relié mécaniquement aux roues et à la machine électrique par l'intermédiaire d'un couplage mécanique (Figure 9). Il existe deux variantes pour réaliser ce couplage mécanique : soit le moteur thermique et la machine électrique sont sur même arbre, soit ils sont interconnectés par un train épicycloïdal. Les efforts des deux machines peuvent alors s'additionner pour propulser le véhicule (fonction « boost ») [Schouten, 2002]. La propulsion du véhicule peut être alors en mode tout électrique (Figure 9, Flux 2), en tout thermique (Figure 9, Flux 1) ou en hybride (Figure 9, Flux 1 + 2). Comme il n'y a que deux moteurs, cette solution est plus compacte que la chaîne de traction hybride série [Mester, 2007]. Le flux 3 est la recharge de la batterie par le biais du moteur thermique.

Les avantages de ce type de structure par rapport à la structure hybride série est un meilleur rendement global pour les demandes en puissances importantes. La complexité de la répartition des couples des deux moteurs et la boîte de vitesses à trois entrées mécaniques sont les points faibles de cette architecture.

Des exemples de véhicules lourds sont présentés dans le Tableau 6. Un bus hybride parallèle américain est illustré sur la Figure 10.



Figure 10 : Autobus hybride parallèle « New Flyer »

Nom du véhicule	Puissance moteur thermique (kW)	Puissance machine électrique (kW)	Stockage d'énergie	Année de fabrication
Allison /MCI /ISE Research	250		NiMH	2002
Allison/New Flyer	210	160	NiMH	2002
Allison/New Flyer	150	200	28kWh Batteries au plomb (Gel)	2000
Volvo 7700 Hybrid	161	70 (120kW _{MAX})	Li-ion	2009

Tableau 6 : Exemples de véhicules hybrides parallèle (données constructeurs et [EERE, 2005])

1.2.4 Caractéristiques de l'hybride série-parallèle

La chaîne de traction de type « série-parallèle » (aussi appelée « power-split »), dont la référence actuelle est la Toyota Prius, est une combinaison entre une chaîne de traction série et une chaîne de traction parallèle. Cette chaîne de traction est aussi appelée chaîne de traction à dérivation d'énergie, car une partie de la puissance mécanique produite par le moteur thermique est détournée par la machine électrique 2 qui est ensuite réinjectée par le biais de la machine électrique 1 (Figure 11, Flux 1 + 4). Ce type de fonctionnement permet de découpler totalement le point de fonctionnement du moteur thermique de celui du véhicule [Miller, 2005]. En phase de freinage, les deux machines électriques reconvertissent de l'énergie cinétique en énergie électrique dont une très petite quantité est stockée dans la batterie (Figure 11, Flux 2 + 3) [Beranger, 2009].

La chaîne de traction hybride « série-parallèle » a la possibilité de combiner les avantages des hybrides séries et parallèles donc un fonctionnement série en basse vitesse et parallèle pour les puissances élevées. La transmission mécanique et la commande sont très complexes car pour un point de fonctionnement, il existe une multitude de solutions pour répartir le couple entre les trois moteurs.

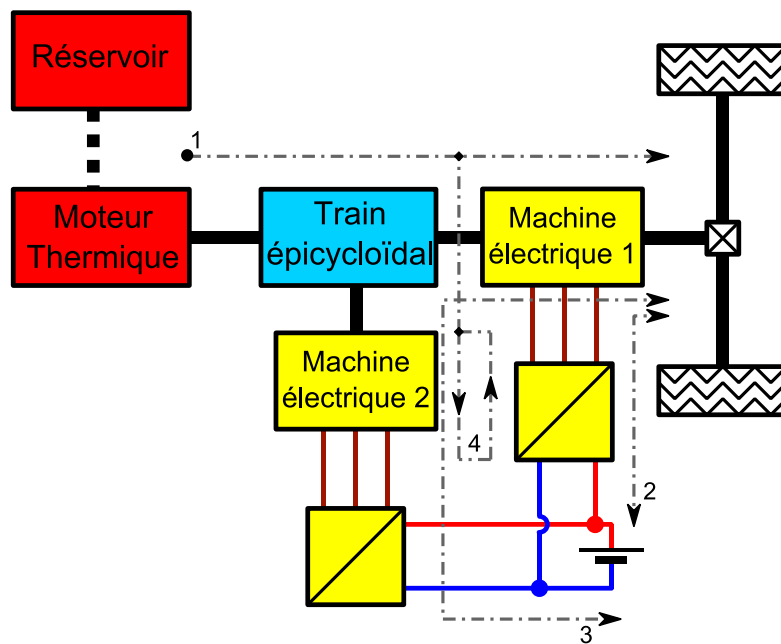


Figure 11 : Exemple de chaîne de traction hybride série-parallèle

Il n'a été recensé qu'un seul autobus utilisant une architecture de type « série-parallèle », l'ISE (Figure 12). Dans l'ISE, la puissance électrique installée est identique à la puissance thermique. Le stockage d'énergie peut être réalisé à partir de supercondensateurs ou à partir de batteries NIMH.



Figure 12 : Autobus ISE

Nom du véhicule	Puissance moteur thermique (kW)	Puissance machine électrique (kW)	Stockage d'énergie	Année de fabrication
ISE	145	170	200kW (SC ou NiMH)	

Tableau 7 : Exemples de véhicule hybrides série-parallèle (Données constructeurs et [EERE, 2005])

Les trois types de chaînes de traction sont résumés dans le Tableau 8, la chaîne de traction série est celle qui se rapproche le plus d'une voiture électrique, contrairement à l'hybride parallèle qui ressemble plus à une voiture thermique classique. Le dernier est l'hybride série-parallèle qui permet un découplage entre le point de fonctionnement de la traction (vitesse du véhicule et couple) et le point de fonctionnement du moteur thermique (vitesse de rotation et couple sur l'arbre moteur).

Architecture	Avantages	Inconvénients
Série	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité de la chaîne de traction, aucune boîte de vitesses • Simplicité de la commande en couple de la traction (provenant entièrement de la machine électrique) 	<ul style="list-style-type: none"> • Toute la puissance du moteur thermique transite par le réseau électrique
Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> • Les flux de puissance des moteurs thermique et électrique(s) sont directement couplés mécaniquement • Réutilisation en grande partie des chaînes de traction thermique 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexification de l'arbre de transmission et de la boîte de vitesses • Commande en couple de la traction difficile
Série parallèle	<ul style="list-style-type: none"> • Suppression de la boîte de vitesses mécanique • Déconnexion totale entre le point de fonctionnement de la traction et du point de fonctionnement du moteur thermique 	<ul style="list-style-type: none"> • Commande plus complexe des machines électriques • Complexité des flux de puissance transitant dans la chaîne de traction

Tableau 8 : Comparatif entre les chaînes de traction

Nous avons vu que par l'hybridation, nous cherchons à optimiser le fonctionnement de chaque source. Cela voudrait dire par exemple moins de consommation en carburant fossile, moins de pollution, une longue durée de vie des batteries ou pile à combustible, mais aussi la sécurité en fonctionnement ou en cas d'accident, un moindre coût, en plus de meilleures performances dynamiques des véhicules et une autonomie accrue. Il n'existe pas une hybridation parfaite, chaque hybridation répond à des critères de performance pour les faibles vitesses, les forts couples, la simplicité de la commande ou la simplification de la chaîne de traction mécanique.

Evidement, remplir tous ces critères à la fois n'est pas facile. Pour cette raison la stratégie de partage de flux de puissance des différentes sources n'est pas simple.

1.2.5 La gestion d'énergie

La fonction principale de la gestion d'énergie consiste à répartir les flux entre les sources d'énergie. Elle doit permettre une utilisation optimale des différentes sources d'énergie/puissance à bord du véhicule. Les exemples de lois de gestion que nous montrons dans ce paragraphe sont issues du domaine du véhicule hybride ainsi que du celui des sources électriques hybrides.

La gestion de l'énergie à bord du véhicule dépend de plusieurs facteurs : la topologie de la chaîne de traction du véhicule, le taux d'hybridation, l'autonomie en combustible fossile, l'autonomie en énergie électrique, le profil de mission et la technologie du stockage d'énergie.

Les états de l'art les plus récentes [Salmasi, 2007], [Bayindir, 2011] convergent vers deux grandes catégories des lois : les règles heuristiques (« rule-based » en anglais) et les règles optimales. Les règles heuristiques sont issues de l'expérience du concepteur, simples à mettre en œuvre, sans un a priori sur le trajet, facilement mises en œuvre sur un ordinateur temps réel. Les règles optimales ont souvent comme objectif de minimiser un critère ... par exemple la minimisation des pertes, la diminution des variations d'état de charge, le fonctionnement d'un moteur thermique dans une zone de rendement maximum ...

Les règles ainsi créées doivent avoir une certaine robustesse envers les perturbations extérieures comme par exemple le changement des conditions de circulation, le changement de la masse du véhicule, le changement de mission et également le style de conduite du conducteur.

Les règles heuristiques

Ces règles sont basées sur des stratégies très simples pour la gestion du flux d'énergie. Les stratégies sont de l'ordre de la limitation ou du filtrage d'un paramètre. Le réglage des paramètres se fait à l'aide de l'expérience du concepteur.

Pour ce type de gestion d'énergie, il existe différentes règles :

- Dite du « thermostat » : le moteur thermique fonctionnera toujours à son point de fonctionnement optimal [Chau, 2002]. Lors de l'utilisation du véhicule, les supercondensateurs associés à des batteries vont fournir ou stocker la totalité de la puissance nécessaire au véhicule et le moteur thermique régule l'état de charge des supercondensateurs/batteries. Des versions plus abouties de cette stratégie (« Power Follower (Baseline) Control Strategy » et « Modified Power Follower (Base Line) Strategy ») sont résumés dans [Moura, 2010]. Une variante de cette stratégie consiste dans la régulation d'un bus DC par les supercondensateurs et la régulation de leur état de charge par un groupe diesel-électrique [Yoo, 2008], [Cao, 2012].

- Le filtrage du courant à différentes fréquences de coupure [Miller, 2005], [Akli, 2008], [Thounthong, 2009] : par exemple dans un système multi-sources comme la locomotive hybride PLATHEE, la source qui a la plus grande constante de temps (la plus grande inertie) fournit les courants de basses fréquences (groupe diesel-électrique), la deuxième source d'énergie capte et fournit les courants de fréquences moyennes (batteries) et les hautes fréquences sont fournies par la dernière source qui peut réagir instantanément (supercondensateurs). La locomotive du programme PLATHEE de la SNCF utilise cette règle du filtrage du courant pour la répartition des flux de puissances : les basses fréquences pour le moteur thermique, les fréquences moyennes pour les

batteries NiMH et les hautes fréquences pour les supercondensateurs. Cette locomotive, qui est une plateforme d'essais, a déjà parcouru plus de 500km entre Saint Pierre des Corps et Blois [RGCF, 2012] et l'hybridation a permis une réduction de la consommation en carburant et de la pollution de l'ordre de 32%.

- En fonction de l'accélération [Allegre, 2010] : la puissance nécessaire aux accélérations ou décélérations est fournie ou stockée dans les supercondensateurs et le reste de l'énergie (des pertes aérodynamiques, auxiliaires, ...) est fournie par des batteries. Cette règle a été testée dans un microbus de GRUAU et il ressort dans la thèse d'Anne Laure Allègre que c'est la meilleure gestion d'énergie car elle sollicite peu les batteries [Allegre, 2010] mais aucune augmentation ou réduction significative de la consommation énergétique n'a été observée.

- La limitation du courant [Carter, 2008], [Ortúzar, 2007], [Guidi, 2009], [Butterbach, 2010] : le courant de la batterie est limitée à une certaine valeur fixe ou dynamique. Les supercondensateurs fournissent la différence en courant entre le courant batterie et la demande du véhicule. Lors du freinage, les supercondensateurs et/ou les batteries reçoivent l'énergie du freinage électrique. Cette règle a été testée dans un véhicule léger appelé Cobra [Carter, 2008]. Cette voiture intègre des batteries au plomb et des supercondensateurs. L'algorithme a été réglé dans le but d'augmenter l'autonomie du véhicule ou alors dans le but d'augmenter la durée de vie des batteries au plomb en diminuant le courant de la batterie. Cette règle a aussi été testée dans le cadre du projet du microbus hybride de GRUAU [Microbus, 2008], la conclusion du projet met en évidence le rôle des supercondensateurs dans l'augmentation de la durée de vie, plus que dans l'autonomie du véhicule.

Les règles empiriques permettent une solution de fonctionnement très simple à mettre en place et très rapide en exécution. Des implémentations sous forme de réseaux neuronaux [Won, 2003], [Ortúzar, 2007] ou logique flou [Xiong, 2009] ont été également proposées.

Les règles optimales

Dans ce type de stratégie, le partage des flux d'énergie est fait par la minimisation d'un critère, d'une fonction cout, tenant compte soit de la consommation d'énergie, soit des émissions [Scordia, 2004]. Les nombreux paramètres entre en jeu, ainsi que la nécessité permanente d'adaptation à l'environnement, sa méconnaissance, font que ces règles ne sont pas applicables en temps réel. Généralement il y a besoin de la connaissance du trajet entier afin de trouver l'optimum ce qui même de nos jours n'est pas facile même si les GPS nous indiquent les distances, pentes et les embouteillages ... mais des recherches récentes [He, 2012] ont montré qu'un sous-optimum pouvait être trouvé en temps réel en connaissant juste une partie du trajet. Ces règles font appel à la théorie du contrôle optimale, à la programmation dynamique, à la programmation stochastique ou aux algorithmes génétiques [Salmasi, 2007], [Gao, 2009] et [He, 2012].

1.3 Conclusions

Dans le premier chapitre nous avons fait un état de l'art des différents véhicules hybrides lourds ainsi que des lois de gestion de l'énergie embarquée. Des caractéristiques de diverses sources (batteries, supercondensateurs, volant d'inertie) ont été également rappelées. Les stratégies complexes de partage de flux entre les différentes sources embarquées, l'incertitude du trajet (le profil de mission) et le choix (physique) d'embarquer plusieurs sources d'énergie différentes sont interdépendantes. Afin de briser ce cercle, dans notre étude nous allons nous donner un profil de mission pour la benne à ordures et une stratégie de partage des flux d'énergie. Nous allons ensuite étudier le dimensionnement des sources et explorer les avantages et les inconvénients de la solution proposée.

Nous avons également présenté le contexte de l'étude, le projet ANR ARCHYBALD et le cahier des charges qui découle de ce contexte.

Dans le chapitre suivant, nous allons modéliser un véhicule lourd, une benne à ordures ménagères. La modélisation se base sur le châssis existant d'une benne de chez PVI et d'un profil de mission type benne à ordures ménagères. Nous allons proposer une procédure pour le prédimensionnement du stockage mixte. Le stockage mixte utilisé est constitué de supercondensateurs et de batteries au plomb.

Dans le troisième chapitre, nous nous focaliserons sur la modélisation fine de la batterie au plomb. Les points clés de ce modèle sont la modélisation de la dynamique électrique de la batterie et la modélisation de sa limitation en courant de recharge. Ce dernier point permet de mieux estimer le bénéfice de l'association d'une batterie au plomb avec des supercondensateurs qu'un simple modèle ne pourrait montrer.

Le dernier chapitre est dédié à l'analyse du dimensionnement de la benne sous les contraintes des éléments constitutifs du stockage mixte (essentiellement les batteries) et de ceux issus de la loi de gestion des flux de puissance. Nous allons également présenter brièvement les travaux entamés pour la comparaison du vieillissement des batteries alimentant une charge et d'un stockage mixte constitué de la même batterie mais associée à un pack de supercondensateurs.

2 Modélisation de la benne à ordures ménagères

Dans « Recyclage et récupération », N°21 du 6 juin 2011, un panorama des BOM hybrides est dressé. A part les BOM au GNV (gaz naturel pour véhicules - GNVert), sont mentionnées les BOM 100% électriques de Courbevoie (PVI, batterie Li-ion Dow Kokam), les BOM Volvo FE Hybride et les produits hybrides parallèles de Renault Truck. Il faut remarquer aussi le nombre de fabricants qui utilisent un compacteur électrique ou hydraulique : l'Hollandais Geesink Norba, Volvo Truck, PVI, Eurovoirie, Faun Environnement et Rexroth Bosh group.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la modélisation de la BOM, ainsi que les éléments qui ont été utilisés pour le dimensionnement du stockage mixte : le profil de mission et la stratégie de gestion d'énergie. Les trois éléments (dimensions stockage, profil de mission, loi de gestion d'énergie) sont étroitement liés dans un véhicule moderne. Notre véhicule a été modélisé sous VEHLIB, un logiciel de simulation de véhicules hybrides routiers (thermiques, hybrides et électriques) et ferroviaires (tramways et trains) principalement développé au Laboratoire des Transports et Environnement (IFSTTAR – LTE) [Trigui, 2004] mais aussi au Laboratoire des Technologies Nouvelles (IFSTTAR – LTN), pour la partie ferroviaire et pour notre application de la BOM.

VEHLIB repose sur une approche de la modélisation systémique du véhicule à partir d'une bibliothèque d'éléments facilement interconnectables. Cette approche permet de garder la souplesse nécessaire à la création d'une grande variété d'architectures. Chaque élément peut être modélisé à différents niveaux : statique, quasi-statique ou dynamique.

2.1 Description du véhicule

Pour la modélisation de la BOM, nous avons repris quelques éléments d'une BOM existante, le Puncher bi-mode de PVI (voir l'annexe 6 pour les caractéristiques de ce véhicule).

En France, le constructeur PVI propose dans ses catalogues des versions thermiques, bi-mode et tout électrique. La version thermique et la version bi-mode embarquent tout deux un moteur diesel d'une puissance maximale de 206kW. Les versions « tout électrique » et les bi-modes (les caractéristiques techniques sont présentées dans l'annexe 6) sont équipés d'une machine électrique de 50kW nominal pouvant fournir une puissance transitoire de 90kW pour la phase de démarrage, associée à un variateur à commande vectorielle alimentée par un pack de batterie au plomb ayant une tension nominale de 552V. Au niveau du stockage d'énergie, la différence entre la version électrique et la bi-mode se situe au niveau de l'autonomie électrique proposée : la version tout électrique embarque 5,23t de batteries de plomb (soit 164 batteries de 6V/160Ah-32kg) contre 2,94t de batteries (soit 92 batteries de 6V/180Ah - 32kg) dans la version bi-mode. L'autre grande différence est la masse à vide des véhicules : la version thermique a une masse à vide de 6tonnes contre 10tonnes pour les deux autres versions (batteries incluses).

La BOM que nous avons modélisée reprend tous ces éléments, sauf les dimensions de la batterie, que nous avons redimensionnée en utilisant un stockage mixte. Nous avons aussi vérifié que

la puissance des moteurs électriques du bi-mode de PVI est compatible avec celle nécessaire au suivi du profil de mission ARTEMIS400 (établi pour un véhicule thermique).

Un schéma de principe est illustré sur la Figure 13 : le flux d'énergie électrique est dessiné en trait fin et celui mécanique en trait épais. Le flux électrique comprend les deux sources, les supercondensateurs et la batterie, leurs convertisseurs associés, le bus continu de 540V, les machines électriques triphasés et leurs onduleurs. Le flux mécanique est composé du moteur thermique et la transmission mécanique (composée d'un double train épicycloïdal, la boîte de vitesses et le différentiel mécanique). Ce schéma simplifié montre déjà les difficultés rencontrées dans la définition et la simulation de la partie mécanique. Dans le cadre du projet ARCHYBALD nous avons essayé de garder l'unité des études faites par les différents partenaires, et une des conséquences est la partie mécanique du véhicule. En effet, cette architecture est issue de la contrainte d'utilisation d'un double train épicycloïdal et du fonctionnel imposé au véhicule militaire [Syed, 2011].

Nous avons aussi fait figurer sur le schéma de principe les auxiliaires (dont le principal consommateur électrique est le compacteur d'ordures) de fait de leur importance dans la consommation énergétique. Dans la suite de ce chapitre nous détaillerons chaque élément.

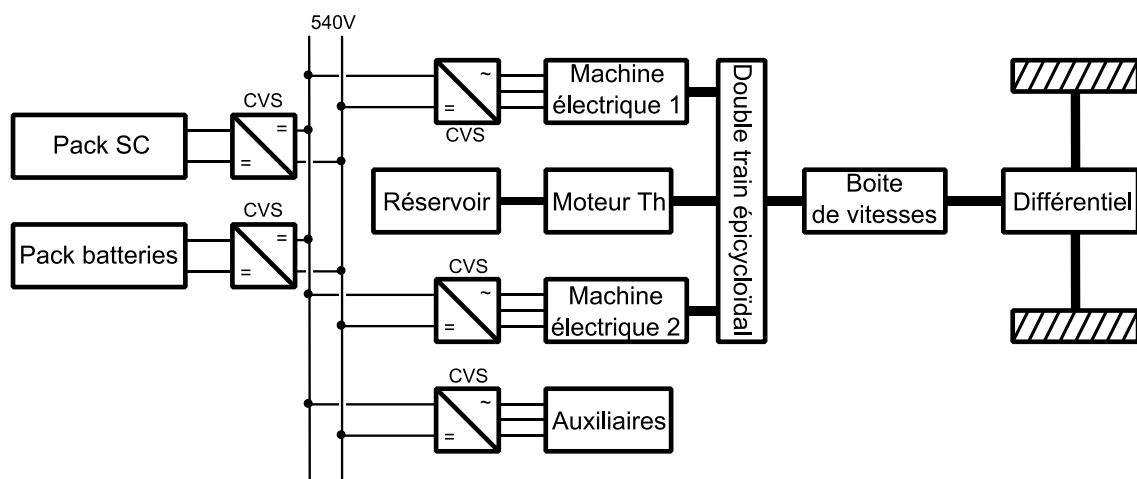


Figure 13 : Schéma de principe de la BOM modélisée

Afin d'avoir une vue d'ensemble du véhicule à modéliser, nous avons présenté la BOM à l'aide de la Représentation Macroscopique (REM) [Bouscayrol, 2000], [Chen, 2009]. Cette représentation permet de structurer le problème et de mettre en avant les possibilités de commande d'une structure aussi complexe. La REM de la benne hybride issue du projet ARCHYBALD est illustrée Figure 14. Nous n'allons pas insister sur les principes et les graphismes (présenté brièvement en annexe 4) de la REM, mais nous pouvons aisément remarquer dans la partie supérieure, la représentation du véhicule hybride (des sources multiples aux roues du véhicule hybride via la chaîne de traction), ainsi que la chaîne de commande obtenue par l'inversion du modèle.

Cette représentation pourrait être encore plus épurée par un mode de fonctionnement tout électrique. Malgré la complexité, le management de l'énergie est très bien mis en évidence dans la partie inférieure de l'illustration, au travers du bloc correspondant au calculateur dans VEHLIB.

Projet ARCHYBALD

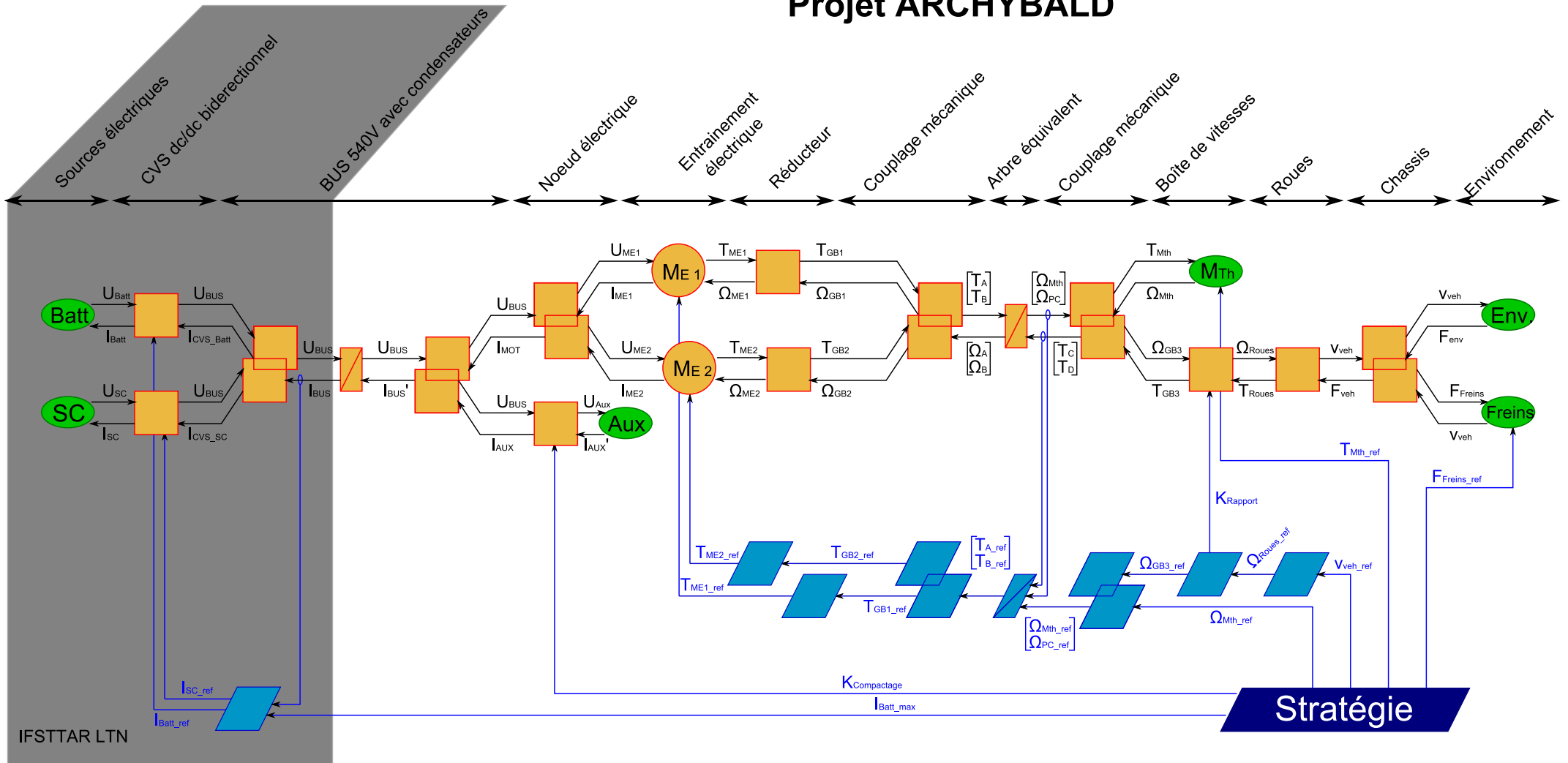


Figure 14 : Représentation Macroscopique de la BOM

2.1.1 Le châssis et la transmission mécanique

Les données techniques nécessaires à notre étude et similaires au Puncher de PVI sont : les dimensions du véhicule, les pneumatiques et la masse du châssis



Figure 15 : Puncher de PVI

Le véhicule se modélise à partir de l'équation du mouvement :

$$\begin{cases}
 F_{Traction} - F_{Résistance} = m \frac{dv}{dt} \\
 F_{Traction} = \frac{1}{R_{roue}} \Gamma_{Traction} \eta_{TM}^k \\
 v = R_{roue} \omega
 \end{cases}
 \quad \text{eq. 1}$$

Avec $\begin{cases} k = 1 ; \text{traction} \\ k = -1 ; \text{freinage} \end{cases}$

$F_{Traction}$ la force de traction et $\Gamma_{Traction}$ son couple correspondant, $F_{Résistance}$ la force de résistance, m la masse totale du véhicule, η_{TM} le rendement de la transmission mécanique, $\frac{dv}{dt}$ représente l'accélération du véhicule, v la vitesse linéaire du véhicule, R_{roue} le rayon de la roue et ω la vitesse angulaire des roues.

La masse du véhicule est considérée constante, à 15t, dans notre étude. Les raisons de ce choix sont liées à la méthode de création du profil de mission. Ces raisons sont expliquées en détail dans le paragraphe suivant.

La force de résistance à l'avancement est calculée à partir de la force aérodynamique, de la force de résistance au roulement et la résistance due à la gravité :

$$F_{Résistance} = F_{aérodynamique} + F_{roulement} + F_{gravité} \quad \text{eq. 2}$$

La force aérodynamique est proportionnelle à la vitesse du véhicule au carré :

$$F_{aérodynamique} = \frac{1}{2} C_x A v^2 \rho \quad \text{eq. 3}$$

Avec : C_x le coefficient de pénétration dans l'air à 0,6, A la surface frontale, v la vitesse relative du véhicule et ρ la masse volumique de l'air 1,202g/l. La force de résistance au roulement est la force de résistance générée par le contact pneumatique/route :

$$F_{roulement} = f_r m g \quad \text{eq. 4}$$

Avec : f_r le coefficient de résistance au roulement fixé à 100N/t et g la gravité terrestre à 9,81m/s².

La résistance due à la gravité s'écrit sous la forme suivante :

$$F_{gravité} = m g \sin \alpha \quad \text{eq. 5}$$

Avec : α l'angle de la pente.

Pour cette dernière force, notre profil de mission est supposé être plat et par conséquent nous négligerons la résistance due à la gravité.

Après étude du profil de mission ARTEMIS 400 (cf. annexe 3) et compte tenu de l'utilisation urbaine du mode tout électrique, il a été choisi de fixer la vitesse maximale du véhicule pendant la phase de collecte à 50km/h. Le rapport de transformation global, noté k dans l'équation 6 est composé du rapport de réduction de la boîte de vitesses en mode électrique et du rapport de réduction du différentiel. Le rapport global de l'arbre de la machine électrique à la roue est égal à 5,95 (proche de celui de PVI) sachant que les pneumatiques ont un rayon de 22,5 pouces (soit 57,2 cm) :

$$k = \frac{v_{Max}}{R_{roue} \omega_{moteur}} \quad \text{eq. 6}$$

avec : v_{Max} , la vitesse maximale du véhicule et ω_{moteur} la vitesse de rotation maximale de la machine électrique.

2.1.2 Modélisation de la chaîne de traction électrique et des auxiliaires

Les ressemblances avec le Puncher s'arrêtent là, car le réseau de bord, le stockage et la traction sont différentes. Un schéma électrique de principe est illustré sur la figure suivante :

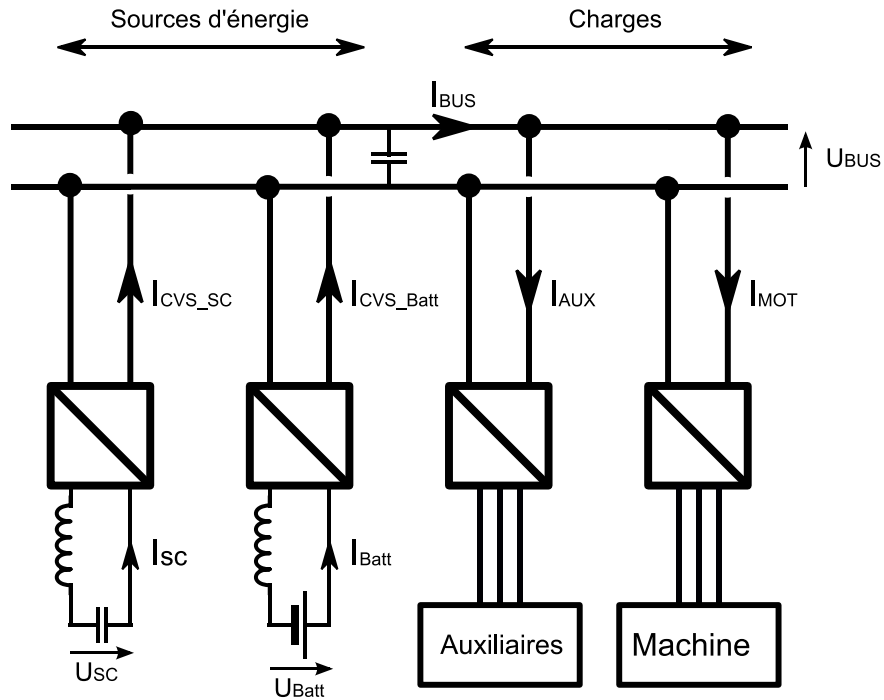


Figure 16 : Grandeurs électriques de la BOM

Après une étape de prédimensionnement, la puissance électrique installée à bord du véhicule est une machine d'une puissance nominale de 50kW avec une puissance crête de 90kW. Le modèle de la machine et de son onduleur est très simplifié. Les pertes du bloc machine électrique – onduleur sont supposés constants et représentent 10% de la puissance instantanée.

$$\begin{cases} P_{\text{électrique}} = \eta P_{\text{mécanique}} (\text{générateur}) \\ P_{\text{électrique}} = \frac{1}{\eta} P_{\text{mécanique}} (\text{moteur}) \end{cases} \quad \text{eq. 7}$$

Les modèles des convertisseurs d'interface entre les batteries et le réseau 540V ou les supercondensateurs et le réseau 540V sont des modèles statiques également. Nous avons fait l'hypothèse simplificatrice, que leur rendement est de 97%. Compte tenu de l'architecture envisagée, nous avons imaginé des hacheurs élévateurs/abaisseurs entrelacés à 2 ou 3 bras. Pour le projet ARCHYBALD, une modélisation plus fine des convertisseurs et des machines électriques a été réalisée, mais dans le cadre de notre étude, une modélisation simplifiée a été considérée suffisante :

$$\begin{cases} P_{BUS} = \eta P_{Pack} \text{ (Pack en générateur d'énergie)} \\ P_{BUS} = \frac{1}{\eta} P_{Pack} \text{ (Pack en récepteur d'énergie)} \end{cases} \quad \text{eq. 8}$$

En ce qui concerne les auxiliaires, plusieurs charges ont été identifiées : climatisation, phares, compacteur d'ordures. Par hypothèse, nous tiendrons compte que de la consommation électrique du compactage et nous négligerons la consommation des autres appareils électriques. Dans un véhicule thermique, le système de compactage est couplé mécaniquement ou hydrauliquement au moteur thermique, mais lors de la conception du profil de mission ARTEMIS 400, la puissance consommée par le compacteur n'a pas été mesurée. Le choix a été de définir que le compacteur fonctionne à sa puissance nominale estimée à environ 10kW lors de chaque instant de compactage. Ces instants sont alors déterminés a posteriori selon deux critères : le véhicule à l'arrêt et le régime moteur supérieur à 900tr/min (le ralenti).

Après avoir défini la structure et les paramètres du véhicule, il reste à dimensionner le stockage d'énergie à l'aide d'un profil de mission et de sa loi de commande.

2.2 Le profil de mission journalière

En 1990, dans le cadre du programme de recherche européen DRIVE suite de l'étude EUREV (Etude sur les Usage REel des Véhicules), l'étude ARTEMIS 400 [Pillot, 1990] [André, 1995] portait en partie sur la définition d'un profil de mission type d'une BOM, profil illustré également sur la Figure 17 (et détaillé en annexe 3).

Une des BOM de Grenoble avait été instrumentalisée afin d'enregistrer un certains nombre de paramètres dont par exemple la vitesse de déplacement ou le régime moteur. Le véhicule instrumenté a alors parcouru une distance totale de 205km pendant une durée cumulée de 21h30 et avec une vitesse moyenne de 9,6km/h. Il s'agissait d'un véhicule Renault RVI "GR 191" équipé d'un moteur diesel atmosphérique et d'une transmission automatique Allison. Le poids du véhicule de 10 tonnes à vide pouvait atteindre 19 tonnes en pleine charge (PTAC = 19 tonnes), lors de cette étude le véhicule était généralement à moitié vide, soit 14 tonnes.

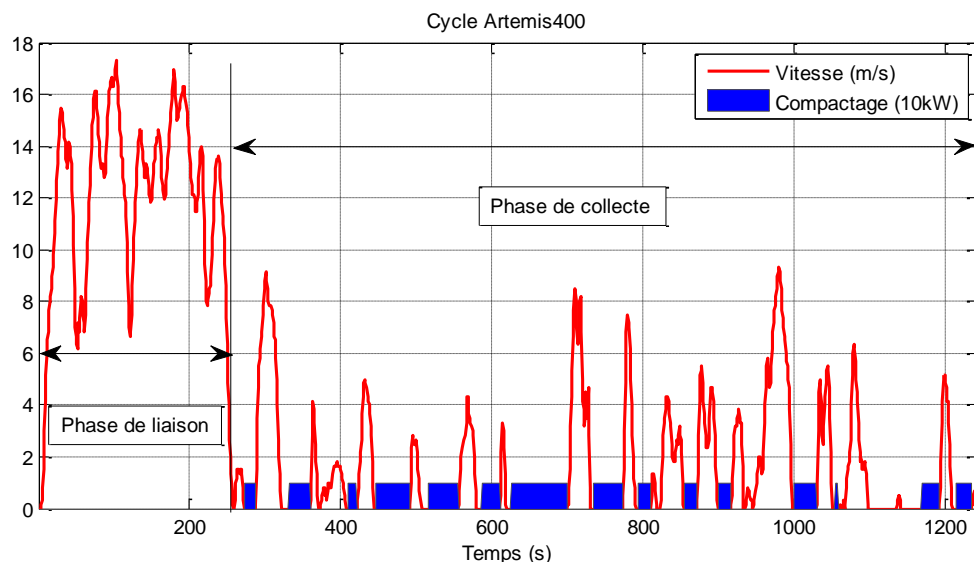


Figure 17 : Profil de mission ARTEMIS pour la BOM (voir détails dans l'annexe 3)

Dans un premier temps, les enregistrements ont été décomposés en portions de trajets. Les différentes séquences ainsi obtenues ont été classifiées en 3 classes : vitesses faibles sur toute la séquence, vitesses élevées sur toute la séquence et trajet avec de très fortes variations de vitesse (fortes accélérations et décélérations). Le poids des trois classes est pris en compte pour reconstruire un cycle type d'une durée de 20 minutes. Dans chacune des classes, un tirage aléatoire des séquences est réalisé. Ensuite les différentes séquences sont concaténées sans a priori sur leur position dans le cycle. Le cycle ainsi obtenu peut être caractérisé par deux étapes : la première phase, de 0 à 287s, est composée des phases de liaison (aller et retour entre la décharge et le lieu de ramassage) et de 287s à 1241s, la phase de collecte.

Un paramètre très important, la masse du véhicule, n'a pas été mesuré lors de la campagne de mesure. Le véhicule ayant une masse à vide de 10 tonnes et atteignant rarement sa masse limite de 19 tonnes lors de la collecte, dans [André, 1995] il a été décidé de fixer la masse du véhicule à 15 tonnes pendant tout le cycle. Nous avons repris cette valeur et vérifié que cette valeur, de 15 tonnes,

n'est pas été choisie au hasard, mais en tenant compte de la puissance maximale que le moteur Renault peut développer et la puissance théorique nécessaire pour suivre le profil ARTEMIS400 :

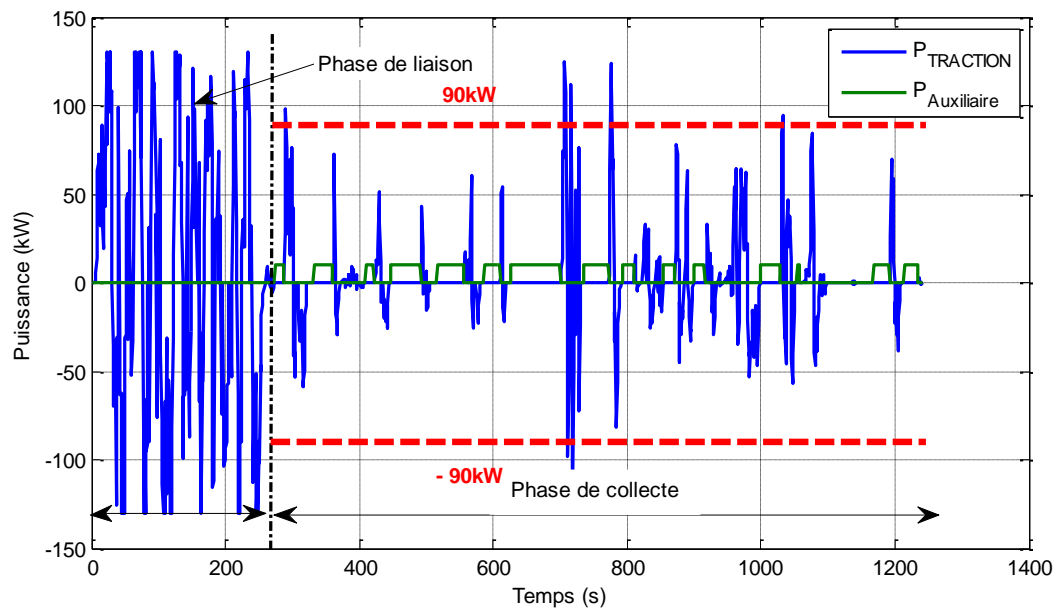


Figure 18 : Puissance de traction et puissance nécessaire aux auxiliaires

Comme nous pouvons la constater, la puissance maximale, théorique (obtenue à partir de la masse, la vitesse et l'accélération du véhicule) est de 130kW. Comme le moteur thermique ne peut développer que 90kW maximum (voir annexe 7), la masse de 15tonnes représente un bon compromis entre la masse du véhicule et l'écrtage de la puissance nécessaire à suivre le cycle.

Ce profil de mission servira de base pour définir les dimensions des différentes parties du véhicule bi-mode. La phase de liaison est caractérisée par des vitesses élevées de 40 km/h et peu d'arrêt. La phase de collecte est, quant à elle, caractérisée par des arrêts fréquents, une vitesse moyenne de déplacement de 5km/h et une multitude d'instant de compactage des ordures ménagères.

Le Tableau 9 répertorie les différents résultats obtenus lors d'une étude théorique, en faisant l'hypothèse du rendement unitaire de la chaîne de traction. La ligne "Energie traction" correspond à l'énergie nécessaire à la traction du véhicule conventionnel, propulsé par un moteur thermique, un véhicule qui dissipe l'énergie récupérable en chaleur, par le freinage mécanique. La ligne « Energie totale consommée » correspond à la consommation d'un véhicule idéal qui récupère toute l'énergie cinétique issue du freinage.

En regardant l'énergie de traction nécessaire, nous constatons qu'il n'est pas raisonnable de réaliser un véhicule entièrement électrique qui respecte le cycle ARTEMIS, rappelons le représentatif pour un véhicule thermique. La raison est la taille et la masse du stockage par batterie au plomb qui seraient bien trop importantes. Pendant la phase de liaison, le véhicule circule à vitesse élevée et il y a peu de variation de vitesse, un fonctionnement thermique du véhicule est une solution raisonnable car cette phase est très consommatrice en énergie (9MJ). Le fonctionnement en mode tout

électrique est envisageable pour la phase de collecte, car le véhicule circule à faible vitesse et ponctué par des arrêts fréquents. De plus, cette phase est moins consommatrice en énergie (5MJ).

Phase de :	Liaison	Collecte
Vitesse moyenne	10.6 m/s	1.4 m/s
Vitesse max	17.3 m/s	9.3 m/s
Accélération min/max		1.3m/s ² et -2,1m/s ²
Puissance moyenne	56 kW	5.8 kW
Puissance max	130 kW	130 kW
Energie traction	9 MJ (2.5kWh)	5.2MJ (1.45kWh)
Energie totale consommée (si récupération 100%)	3.6 MJ (1kWh)	1.2MJ (0.33kWh)
Energie auxiliaires	0	3.6MJ (1.1kWh)

Tableau 9 : Valeurs caractéristiques de la benne à ordures ménagères lors d'un cycle ARTEMIS 400

Ce possible mode de fonctionnement, hybride ou thermique pendant la phase de liaison et tout électrique pendant la collecte, est aussi mis en évidence par deux indicateurs : la vitesse moyenne et la vitesse maximale. Pour la phase de liaison, la vitesse maximale est de 63km/h et la vitesse moyenne est de 38km/h, le rapport de la vitesse max sur vitesse moyenne étant de 1,3. Pour la phase de collecte, la vitesse maximale est de 34km/h et la vitesse moyenne est de 5km/h, le rapport des deux étant très important de 6,6.

Dans la suite du document, nous allons dimensionner le stockage électrique du véhicule en faisant l'hypothèse d'un fonctionnement bi-mode : mode thermique pendant la phase de liaison, et mode tout-électrique pendant la collecte.

Nous allons nous focaliser dans la suite du document exclusivement sur la phase de collecte. Une étude pourrait être menée aussi pour une optimisation de l'utilisation du moteur thermique en y associant les supercondensateurs pendant la phase de liaison, mais le manque de données sur le moteur thermique nous a empêché de l'aborder.

Nous attirons aussi l'attention sur la problématique d'un profil de mission journalier représentatif d'un véhicule électrique lourd. Le cycle ARTEMIS 400 ne dure que 20 minutes. Pour la création d'une journée typique et du fait que ce cycle résulte d'une étude statistique, il est alors possible de répéter 24 fois ce cycle afin d'obtenir une journée type BOM (Figure 19). Cette journée type de la benne à ordures ménagères est alors composée d'une utilisation de la BOM pendant 8h et d'une recharge de 5h pendant la nuit.

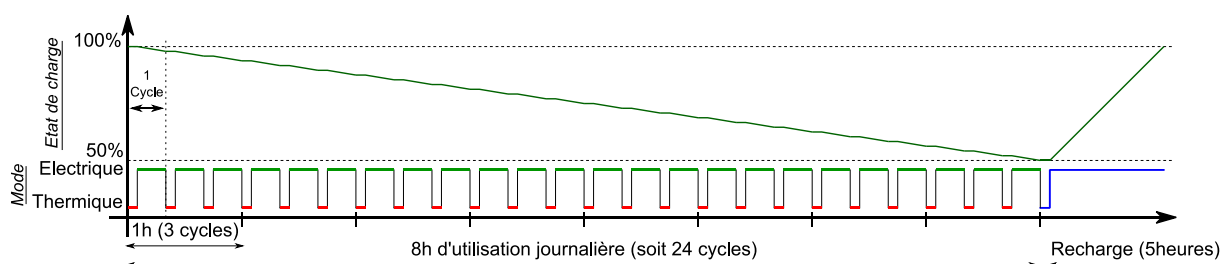


Figure 19 : Journée type de la BOM

2.3 Stockage d'énergie embarqué

L'objectif de ce paragraphe est de proposer une procédure de prédimensionnement du stockage mixte. Les modèles utilisés sont des modèles statiques, simples, car l'objectif est d'obtenir une valeur « initiale » pour le pack de supercondensateurs et de la batterie. Dans le chapitre 4, nous allons étudier l'influence d'un modèle de batterie plus élaboré (développé dans le chapitre 3) sur les performances du véhicule et sur la méthode de dimensionnement du stockage mixte.

2.3.1 Modèles supercondensateurs et batteries

Le modèle utilisé pour le pack de supercondensateurs est un modèle constitué d'une capacité principale en série avec une résistance interne et avec une cellule RC de surtension (en fonction des données disponibles pour chaque supercondensateur). Il s'agit d'une version simplifiée du modèle développé dans [Hammar, 2006].

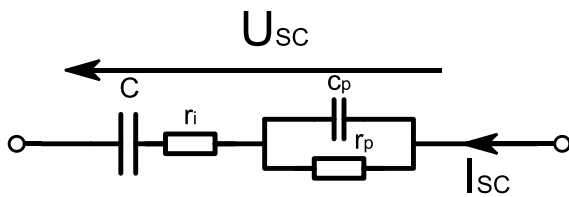


Figure 20 : Modèle constructeur de supercondensateur

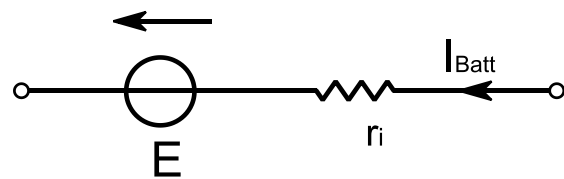


Figure 21 : Modèle constructeur de la batterie au plomb

$$Z_C(s) = \frac{1}{C s} + r_i + \frac{r_p}{1 + r_p C_p s} \quad \text{eq. 9}$$

avec : C la capacité nominale du supercondensateur, r_i la résistance interne fournie par les données constructeurs, la cellule $r_p C_p$ une cellule de surtension observée lors du passage du courant et s l'opérateur de Laplace.

Le modèle simple de la batterie au plomb est basé sur les données du constructeur fournies par Enersys (voir aussi dans l'annexe 8). Ce modèle est constitué d'un générateur idéal de tension en série avec une résistance interne. De plus, ces deux éléments dépendent de l'état de charge de la batterie obtenu par l'intégration du courant. La loi de Peukert qui lie la capacité de la batterie au courant n'est pas prise en compte dans ce modèle.

$$U_{Batt} = E (SoC) + r_i (SoC) I_{Batt} \quad \text{eq. 10}$$

avec : E la tension à vide de la batterie, r_i la résistance interne fournie par les données constructeurs [Armasafe, 2012].

2.3.2 Gestion de l'énergie à bord

Le stockage hybride doit avoir une gestion d'énergie pour partager le flux de puissance entre les deux sources. La règle que nous nous sommes donnée réside dans la limitation du courant de la batterie. Les supercondensateurs fournissent alors la différence entre le courant demandé par le véhicule et le courant fourni par la batterie et limité à une valeur imposée. La variable d'ajustement, sera dans ce cas, la valeur du courant des supercondensateurs. Pour obtenir la référence du courant des SC, nous mesurons le courant circulant sur le bus continu et nous lui soustrayons la valeur maximale admissible du courant dans les batteries. Cette loi de gestion peut être écrite sous la forme mathématique suivante :

$$I_{CVS_SC_ref} = I_{BUS\ mesuré} - I_{CVS_Batt_Max} \quad \text{eq. 11}$$

Etant donné qu'il y a des convertisseurs pour l'interface les sources et les machines électriques, les dynamiques sont maîtrisées et la fonction est réalisable. Électriquement parlant, les batteries régulent la tension du bus et les supercondensateurs imposent les courants sur le bus continu.

Il est à noter dans l'eq. 11 que la limitation du courant de la batterie est faite au niveau du bus continu ($I_{CVS_Batt_Max}$). Un autre choix possible est la limitation du courant de la batterie, I_{Batt} , algorithme illustré sur la Figure 23. Nous avons choisi d'explorer la première option. La justification vient du choix de garder constante la puissance délivrée par la batterie. Le fait de limiter le courant sur le bus permet de compenser la baisse de la tension des batteries. Une courte analyse du deuxième choix sera présentée dans l'annexe 5, notamment son influence sur le dimensionnement des sources.

L'algorithme intégré dans le véhicule simulé, illustré sur la Figure 22, est composé de la règle de la limitation du courant mais aussi de toutes les sécurités. Il est illustré sur la Figure 24. Tant que les supercondensateurs n'ont pas atteint une butée en tension minimale de décharge ou maximale en charge, le courant de la batterie sera alors limité entre 0A et la valeur de limitation. Les supercondensateurs sont rechargés à l'aide du freinage électrique et, en cas de décharge trop importante, par les batteries.

Les butées en tension des supercondensateurs sont $U_{SC_Max} = 2,7V$ (pour chaque supercondensateur du pack) pour la tension maximale en charge et $U_{SC_min} = \frac{U_{SC_Max}}{2} = 1,35V$ (pour chaque supercondensateur du pack) pour la tension minimale de décharge. Une marge de 0,1V par supercondensateur est à prévoir pour avoir la possibilité de récupérer de l'énergie avant la première accélération, premier instant de consommation de l'énergie des supercondensateurs.

Pour la batterie, les butées en tension des batteries sont $U_{Batt_Max} = 14,28V$ (pour chaque batterie du pack) pour la tension maximale en charge et $U_{Batt_min} = 10,5V$ (pour chaque batterie du pack) pour la tension minimale de décharge.

Lorsque les supercondensateurs atteignent une butée en tension, le courant des supercondensateurs est annulé et la totalité du courant est alors fournie ou absorbée par la batterie sous condition qu'elle puisse le faire. Lorsque la batterie atteint aussi sa limite en tension maximale, les freins mécaniques sont alors utilisés pour ralentir le véhicule et lorsque la batterie atteint sa butée en tension minimale, l'accélération du véhicule est alors limitée. Pour supprimer tout risque d'oscillation ente deux modes de fonctionnement, plusieurs contrôleurs proportionnel-intégral ont été ajoutés pour lisser le basculement de mode de fonctionnement.

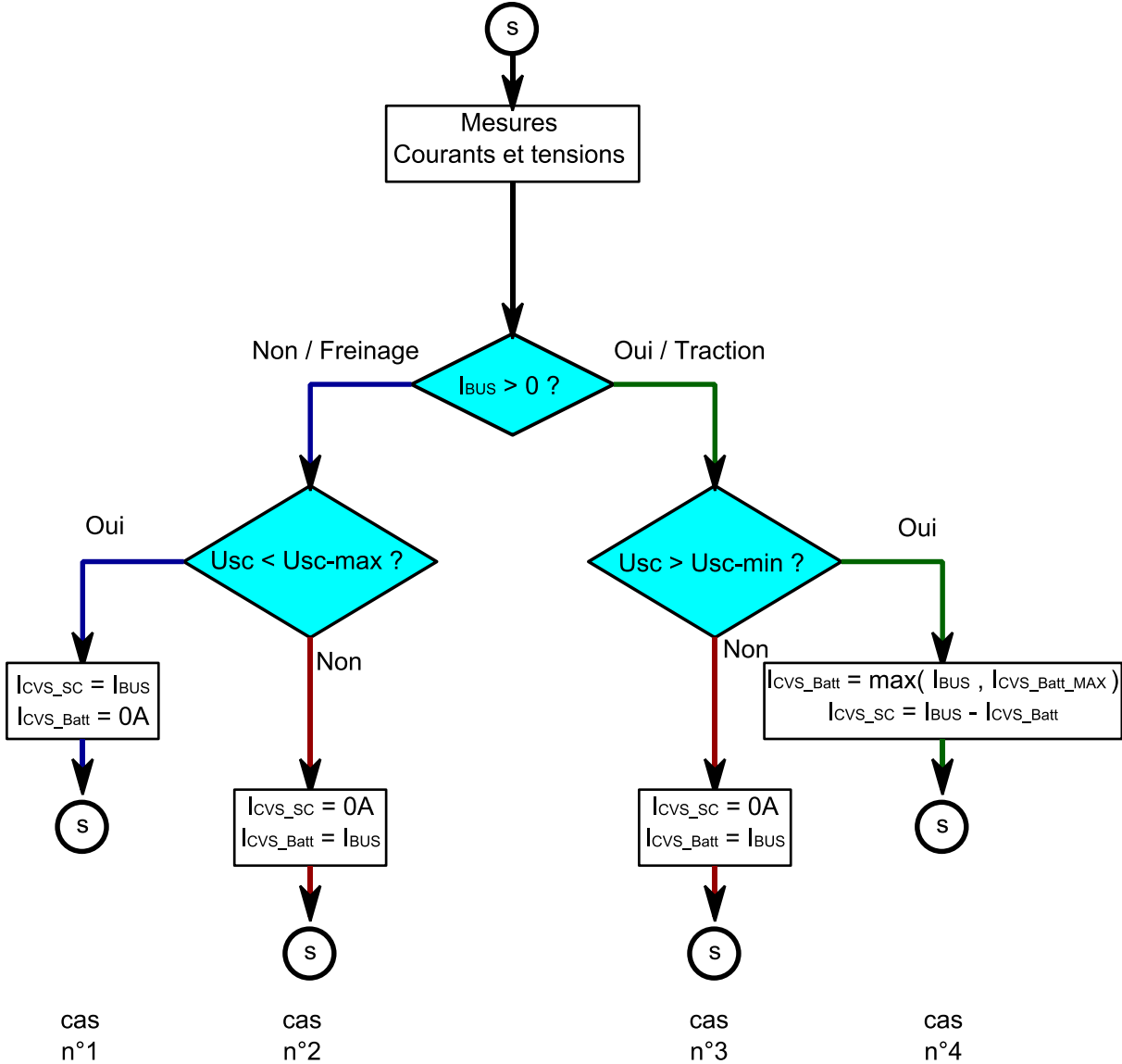


Figure 22 : Algorithme implanté : limitation du courant de la batterie au niveau du bus continu

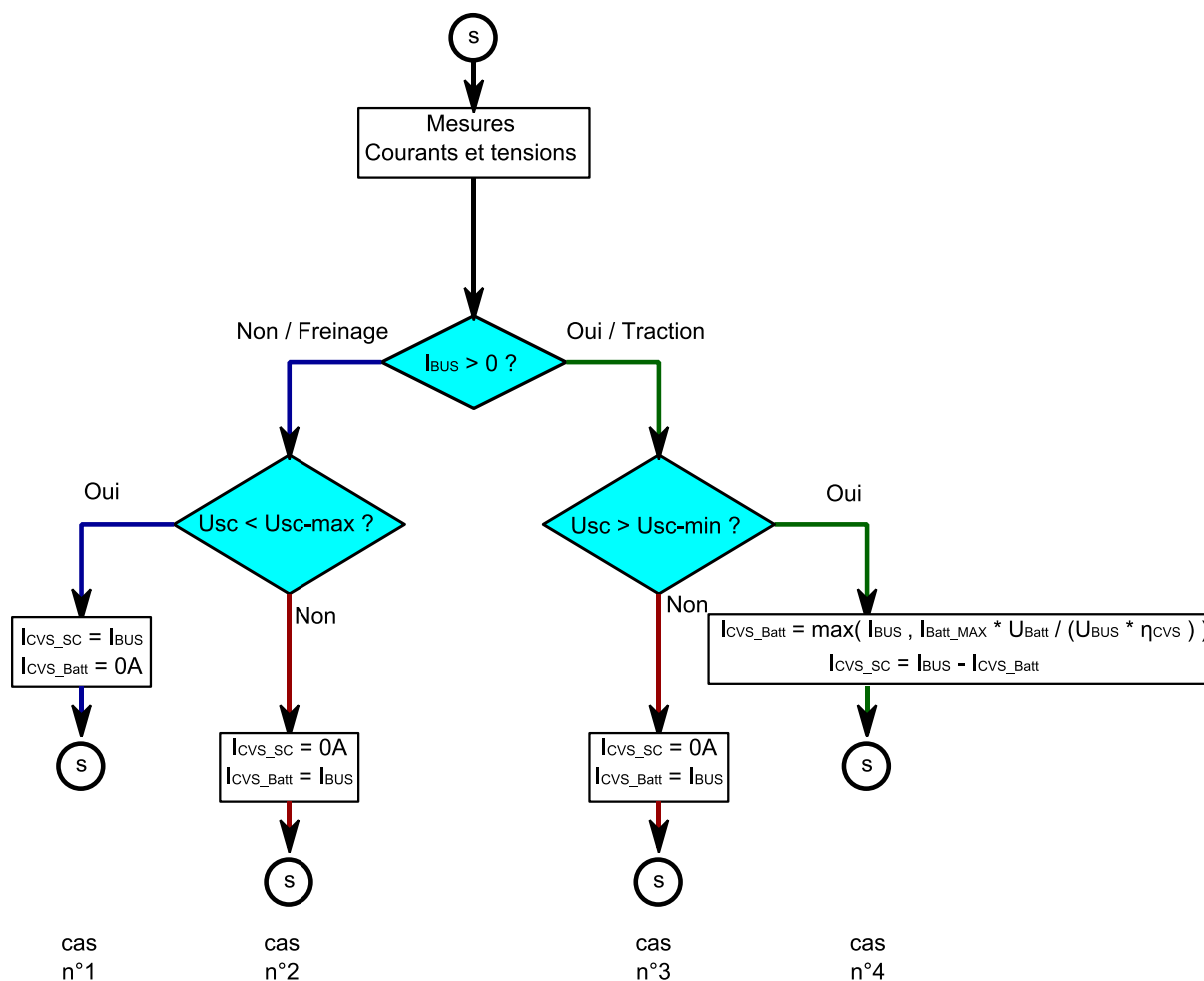


Figure 23 : Une autre option, limitation du courant de la batterie même

Sur la Figure 24, nous avons volontairement sous-dimensionné les supercondensateurs pour faire apparaître les 4 cas possibles. D’abord le cas le plus courant, le n°4, est mis en évidence entre $t=17s$ et $t=24s$, ainsi qu’autour de $t=90s$. Nous constatons que le courant I_{CVS_Batt} de la batterie est bien limité à une certaine valeur (50A) et que les supercondensateurs fournissent le reste du courant. Le cas n°3, correspondant aux supercondensateurs vides et aux batteries fournissant la totalité du courant, est observable entre $t=24s$ et $t=29s$. Le passage entre le cas n°4 et le cas n°3 se fait de façon douce pour ne pas avoir de variation brutale des consignes de courant. Le cas n°1, la recharge des supercondensateurs par le freinage électrique du véhicule, est remarquable à $t=30s$ et $t=95s$. Le dernier cas (n°2), correspondant à la recharge des batteries par le biais du freinage électrique, est illustré aux instants 45s et 95s. Du fait du sous dimensionnement, à chaque freinage électrique, les batteries sont rechargées par le freinage (pics négatifs de couleur orange lors des freinages).

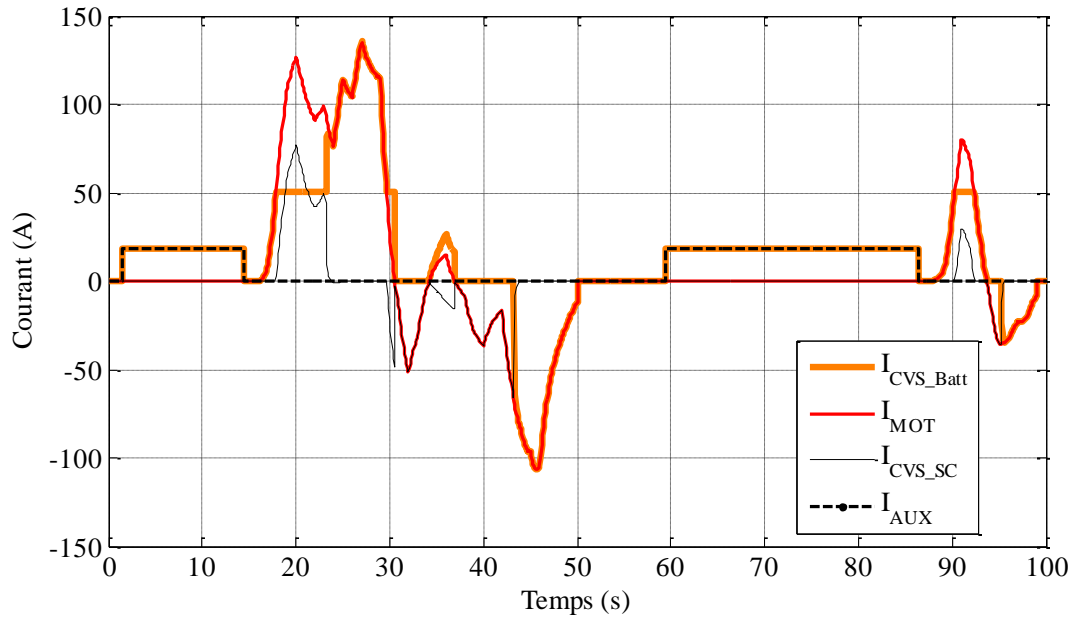


Figure 24 : Exemple de limitation du courant à 50A avec un pack de SC de 1,5F

Pour plus de réalisme, l'algorithme est programmé en langage C et intégré dans un bloc S-fonction de matlab/simulink. Le taux de rafraichissement des consignes de courant du stockage d'énergie hybride est alors de 100ms.

Une fois le modèle du véhicule défini, ainsi que la loi de gestion d'énergie, il ne reste plus qu'à dimensionner le pack de batterie et de supercondensateurs. Après une formalisation simple du modèle de la benne à ordure ménagère, un prédimensionnement du stockage peut être réalisé.

2.3.3 Le prédimensionnement

La procédure du prédimensionnement est affichée sur la Figure 25. A partir des deux variables d'entrée, la masse du véhicule (moyenne sur la durée du cycle ARTEMIS) et le profil de la mission (profil de vitesse et consommation auxiliaires), la procédure de prédimensionnement permet de connaître un ordre de grandeur pour les packs de supercondensateurs et la batterie, ainsi que la plus petite valeur à laquelle nous pouvons limiter le courant dans la batterie. L'idée principale est de fournir la puissance moyenne par les batteries et le reste de la puissance instantanée par les supercondensateurs. La condition finale que nous imposons est de retrouver à la fin du cycle le niveau d'énergie initiale dans les supercondensateurs.

La conséquence directe de ce mode de dimensionnement est la priorité accordée au calcul de la quantité d'énergie des packs supercondensateurs et batterie, priorité par rapport au dimensionnement en puissance. La puissance maximale, dimensionnante, de chaque composant du stockage mixte sera traitée comme une conséquence, issue de la puissance demandée par la charge et la limitation en puissance/courant de la batterie

Le profil de vitesse et la masse du véhicule sert à calculer (par la dérivée de la vitesse) la puissance mécanique nécessaire au mouvement du véhicule⁵. Cette puissance mécanique est égale à la puissance électrique au niveau des sources d'énergie électrique au rendement près de la chaîne de traction. Toute la chaîne de traction est modélisée par des rendements statiques : les convertisseurs statiques de puissance (97%), les supercondensateurs (99%), transmission mécanique (95%), machine électrique de traction (92%). A cette puissance électrique s'ajoute la puissance consommée par les auxiliaires afin d'obtenir la puissance totale consommée par le véhicule (P_{BOM} sur la Figure 26).

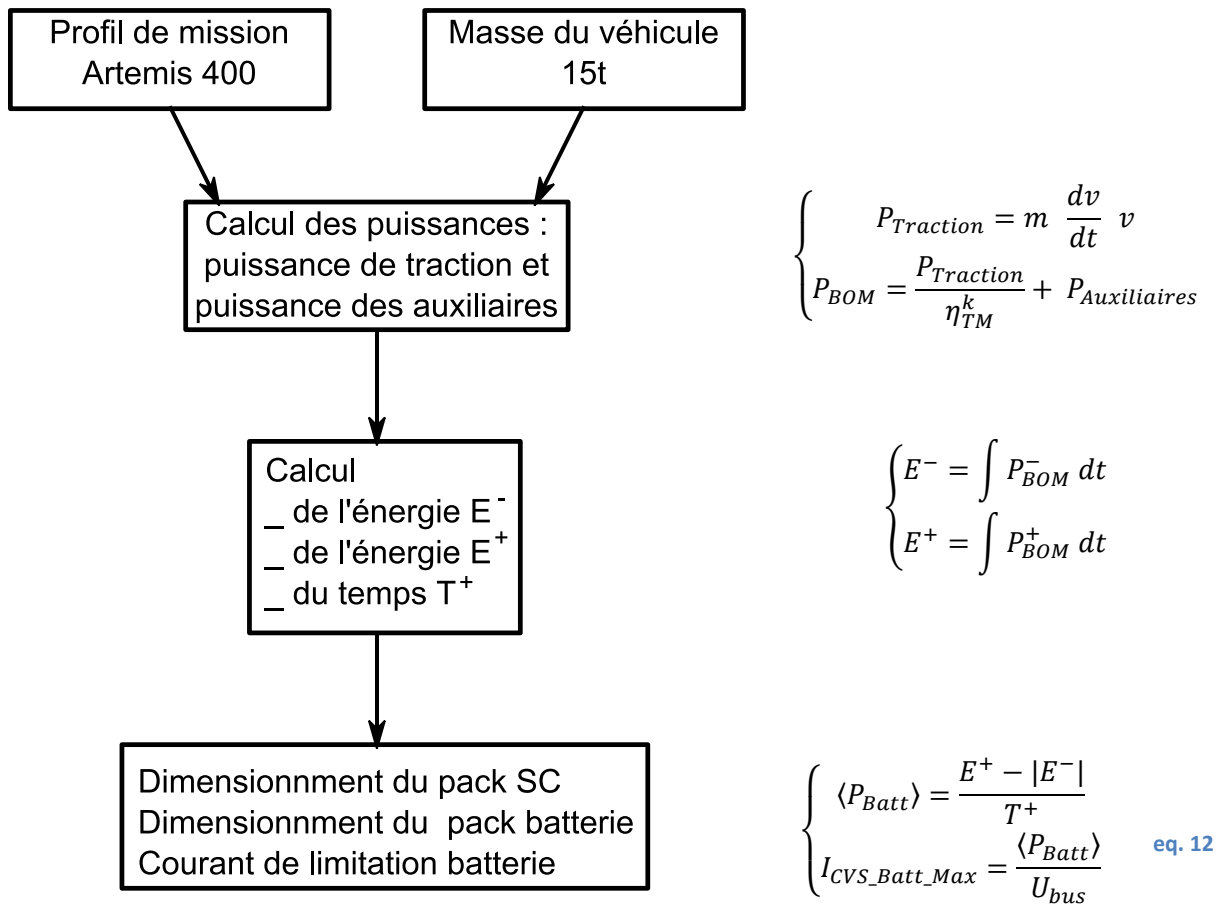


Figure 25 : La méthodologie du prédimensionnement

Dans cette procédure, nous considérons que les supercondensateurs sont suffisamment capacitifs pour récupérer toute l'énergie de freinage. Il n'y a pas de limitations non plus pour les puissances de la batterie ou de convertisseurs statiques de puissance.

⁵ $P = F v = (m a) v = m \frac{dv}{dt} v + F_{Résistance}$

Après avoir calculé E^+ , l'énergie fournie par les sources, et l'énergie E^- , l'énergie récupérée par freinage et stockée intégralement dans les SC, nous calculons aussi le temps T^+ pendant laquelle l'énergie transite des sources vers les charges (machines électriques et auxiliaires). En soustrayant les deux énergies, nous obtenons l'énergie fournie uniquement par la batterie. De cette énergie nous pouvons facilement calculer la puissance moyenne, fournie par la batterie, en la divisant par le temps T^+ .

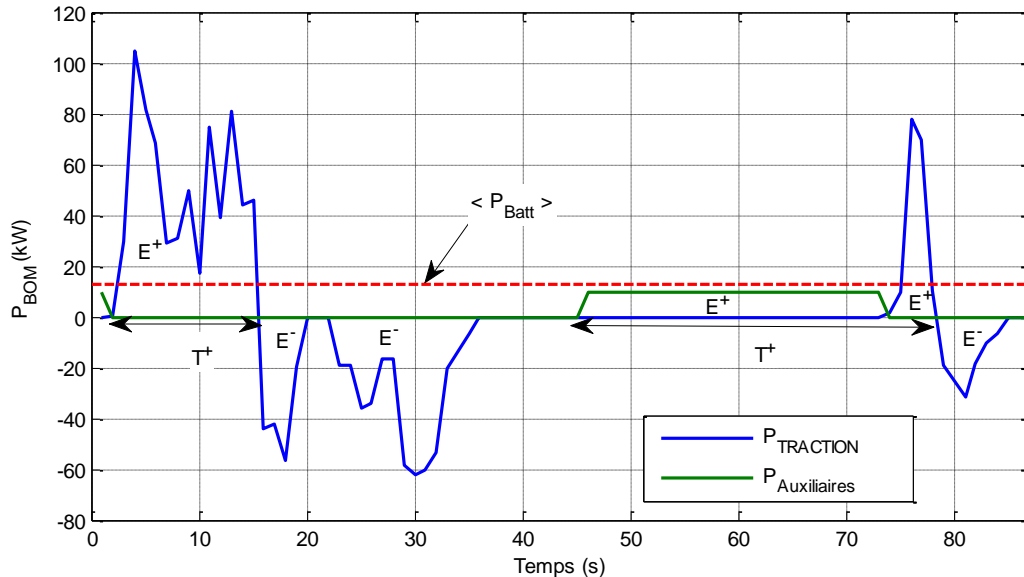


Figure 26 : Estimation du courant maximum de la batterie

Dans une deuxième étape, nous calculons la puissance instantanée des SC, pendant les instants T^+ , par la soustraction de la puissance moyenne de la batterie de la puissance instantanée P_{BOM} . La valeur maximale de la variation de l'énergie des SC sur le cycle va définir la capacité des SC à embarquer – en tenant bien évidemment compte du rapport entre l'énergie stockée et l'énergie utile (Figure 27).

Dans notre application, selon les résultats du prédimensionnement, dans la BOM nous devons embarquer environ 10F de SC et fournir une énergie de 97MJ par les batteries sur 8h. Avec ce dimensionnement et la loi de gestion donnée, la batterie devra fournir que des créneaux de courant d'une amplitude de $I_{CVS_Batt} = 17A$.

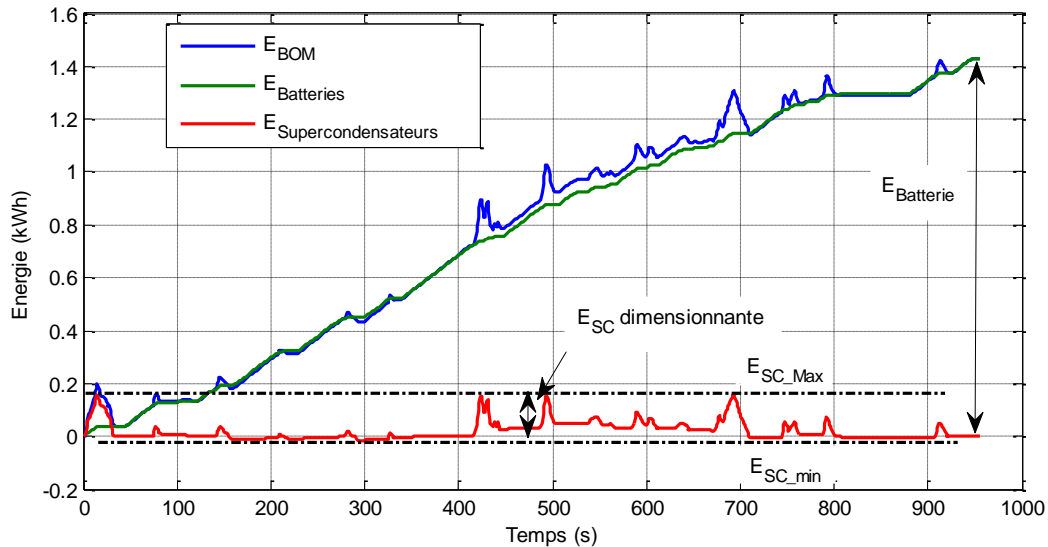


Figure 27 : Prédimensionnement de la BOM

Il faut bien évidemment tenir compte du rapport entre l'énergie stockée et l'énergie utile dans les supercondensateurs⁶. Avec cette procédure de prédimensionnement le pack de supercondensateurs doit être assez grand pour stocker le maximum d'énergie récupérée plus le maximum de l'énergie à fournir. Cela pourrait paraître difficile à comprendre, mais la justification la plus simple est le fait que nous considérons la tension moyenne des supercondensateurs fixée. Si cette tension moyenne est variable (avec la vitesse par exemple) la capacité du pack SC pourrait diminuer.

Pour le dimensionnement énergétique de la batterie, il faut calculer l'énergie consommée par le véhicule sur une journée type. La batterie doit avoir une durée de vie de l'ordre de 1500 cycles (soit 1500 jours \approx 4ans d'utilisation) et le constructeur donne une courbe (Figure 28) qui stipule que pour obtenir 1500 cycles de durée de vie, il ne faut pas avoir une profondeur de décharge supérieure à 50% en fin de journée. Cela nous conduit à un fonctionnement dans la fenêtre de 100%SoC à 50%SoC. Cette hypothèse sur la durée de vie est très importante, car elle va doubler la quantité de batteries à embarquer.

Pour la plage de fonctionnement en température, nous avons regardé la moyenne des températures des 140 dernières années à Paris, ainsi que les valeurs extrêmes [TempMontsouris, 2010]. La moyenne des températures les plus froides (janvier-février) est de 3.6°C, et la moyenne des températures les plus élevées (juillet-août) est de 19°C. Les températures extrêmes ont été enregistrées pendant l'hiver 1953-1954, -15°C, et pendant l'été 2003, +38°C. Nous avons fait l'hypothèse d'un dimensionnement pour un fonctionnement nominal des batteries entre 0°C et 20°C. La température de 0°C est que par hypothèse, nous avons choisi que le véhicule est dans un hangar et que les batteries sont préchauffées le matin avant leur utilisation. Pour un

⁶ Pour une division par deux de la tension maximale nous extrayons les trois-quarts de l'énergie des SC, que nous définissons comme énergie utile, par rapport à l'énergie totale stockée qui correspond à la tension maximale admissible.

fonctionnement à 0°C, la diminution d'énergie disponible est de 11%, il faut donc augmenter la quantité d'énergie de 11% (Figure 29).

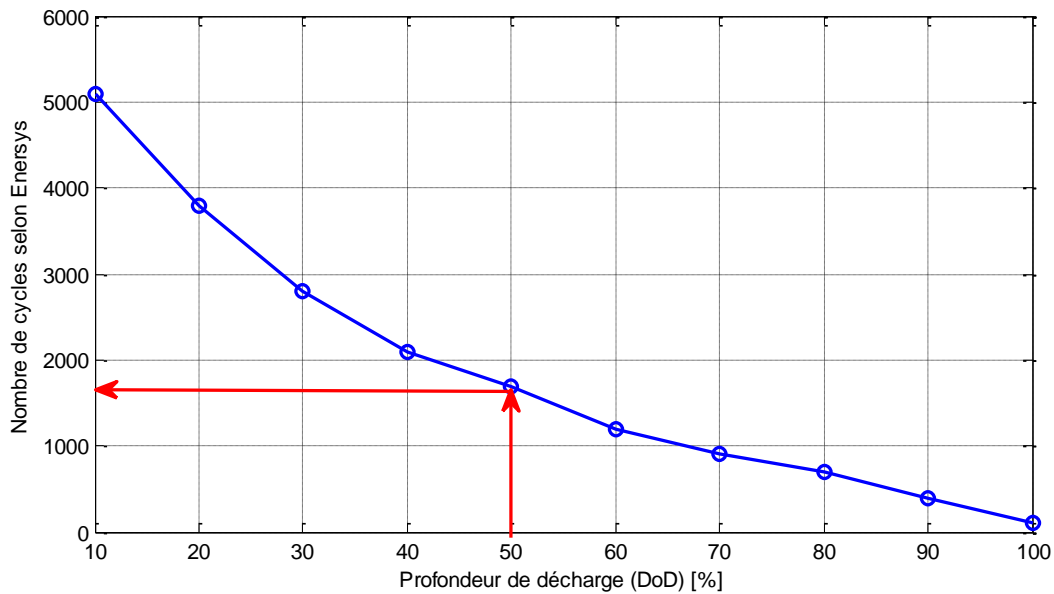


Figure 28 : Durée de vie de la batterie UK6TnMF en fonction de la profondeur de décharge (DoD)

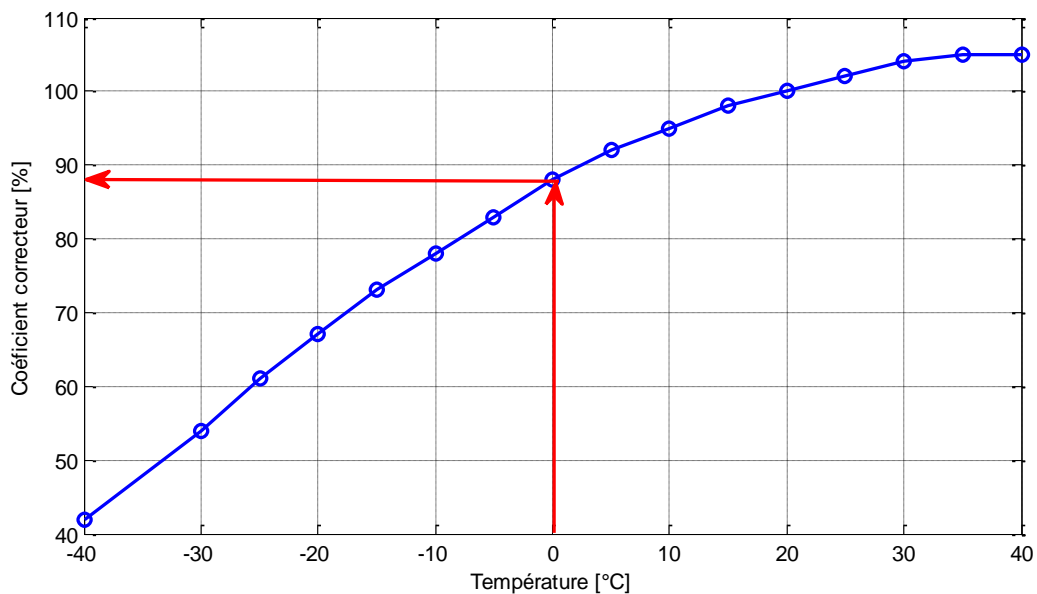


Figure 29 : Influence de la température sur la capacité nominale de la batterie

Dans notre application, selon les résultats du prédimensionnement, dans la BOM nous devons embarquer minimum 10F/540V de SC et fournir une énergie minimum de 1.4kWh (soit 5.2MJ) par les batteries (traction et auxiliaires) sur la phase de collecte. Avec ce dimensionnement et la loi de gestion donnée, la batterie ne devrait fournir que des créneaux de courant d'une amplitude maximale de 17A.

Les données de constructeurs présentées par [Trieste, 2012] montrent, lors de leurs premiers cycles, une diminution rapide de la capacité des supercondensateurs suivie d'une diminution plus lente [Caumont, 2010]. Imaginons que nous choisissons un pack de 10F/540V, la capacité du pack va alors très vite évoluer à 9F/540V (<10F minimum). Ce pack ne permettra pas de correctement limiter le courant circulant dans la batterie par la limitation de l'énergie stockée dans les supercondensateurs. Le pack de 15F/540V permettra un fonctionnement idéal du stockage mixte même lorsque ce pack sera en fin de vie, soit 12F/540V. La masse totale des supercondensateurs sera alors d'environ 200kg.

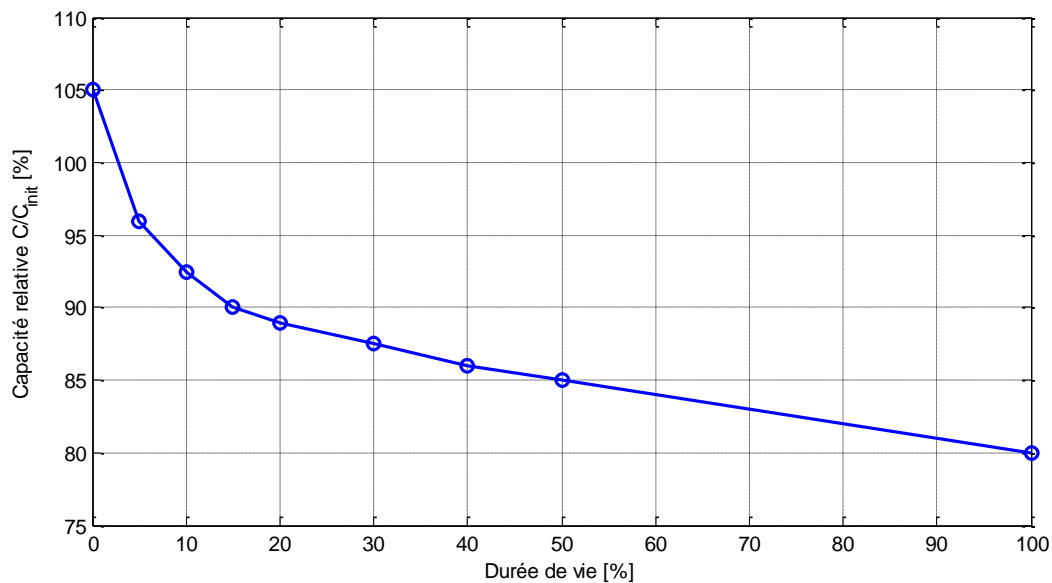


Figure 30 : Evolution de la capacité des supercondensateurs dans le temps [Trieste, 2012]

Le prédimensionnement énergétique des batteries permet de savoir qu'il faut 68 batteries de 12V – $C_{10}=110Ah$. Le choix de l'association des batteries est imposé par la tension du réseau de puissance 540V et par le type de convertisseur envisagé. Le pack de batterie sera alors constitué de deux branches de 34 batteries de 12V – $C_{10}=110Ah$ en série, interfacées par deux hacheurs abaisseurs/élevateurs bidirectionnels en courant. L'association de 34 batteries en série permet d'obtenir une tension nominale du pack de 408V avec une plage de tension de fonctionnement comprise entre 357V et 485V. La masse totale du pack batterie est d'environ 2,7 tonnes si nous optons pour une batterie de 12V – $C_{10}=110Ah$ d'Enersys type « Armasafe plus ».

Le tableau ci-dessous résume les résultats ainsi obtenu pour le prédimensionnement du stockage mixte de la BOM :

Puissance maximale machine électrique	90kW
Pack de batteries	<u>énergie</u> : 34 batteries au plomb de 12V – C ₁₀ =110Ah pour 8h de fonctionnement <u>puissance</u> (nominale) : 9.2kW
Pack de supercondensateurs	<u>énergie</u> : 200 unités en série de 2,7V – 3000F <u>puissance</u> (maximale) : 81kW
Limitation courant batterie (sur le bus DC)	17A

Tableau 10 : Résultat du prédimensionnement

2.4 Résultats de simulation - Importance de la récupération d'énergie par freinage électrique

Les résultats de simulation présentés dans ce chapitre ont été obtenus par la simulation de la BOM avec des modèles simples (décrits précédemment) sur la phase de collecte d'un seul cycle ARTEMIS 400 avec le jeu de paramètres détaillés dans le tableau suivant :

Elements	Grandeurs physiques	Valeurs
Machine	Puissance nominale	50kW (90kW _{max})
	Couple maximum	330 Nm
	Vitesse nominale	1500 min ⁻¹
	Tension nominale	3 x 400Vac (50Hz)
	Courant nominal	100A
	Rendement	92,5%
	Masse	580kg
Pack de batteries	Tension à vide	442V (SoC à 100%)
	Capacité nominale	220Ah
	Resistance interne	68mΩ
	Masse	2,7 t
Pack de supercondensateurs	Tension (max/min)	540V / 270V
	Capacité	15F
	Résistance interne	70mΩ
	Masse	200kg
Loi de gestion	Courant de limitation batterie	25 A
	Tension de seuil de recharge des supercondensateurs	520 V
Boite de vitesse	Rapport de réduction	5.96
	Rendement	95%
Véhicule	Roue	56cm (rayon)
	Masse	15t
	dimensions	2.3m x 3.8m x 8.7m
	Surface frontale	6.44m ²
	Coefficient de trainée	0.6
	Résistance au roulement	100N/t

Tableau 11 : Paramètres de simulation

L'étude utilise uniquement la stratégie de limitation du courant batterie au niveau du bus continu. La limitation du courant batterie est de 25A (et non pas 17A comme issu du prédimensionnement) de manière à pouvoir comparer les performances pour différents packs de SC.

Sur la Figure 31 nous détaillons le fonctionnement normal du stockage d'énergie, pour les 350 premières secondes de la phase de collecte du cycle ARTEMIS : la loi de limitation du courant est respectée, le courant maximal dans la batterie étant de 25A.

Nous pouvons remarquer que les supercondensateurs n'atteignent jamais leur tension maximale, ni minimale, ce qui permet d'avoir un courant de la batterie toujours compris entre 0A et 25A. Cela est dû au bon dimensionnement du pack de supercondensateurs. Le courant efficace de la batterie, côté bus continu I_{CVS_Batt} , calculé sur toute la durée de la simulation, est alors de 19A.

Nous mettons en évidence aussi qu'entre $t=50s$ et $t=80s$, les supercondensateurs se rechargent à partir de la batterie, car leur tension est très basse. Le correcteur proportionnel qui surveille la tension des SC demande un courant faible à la batterie, avec une dynamique lente, mais qui doit ramener les SC à une tension de 520V.

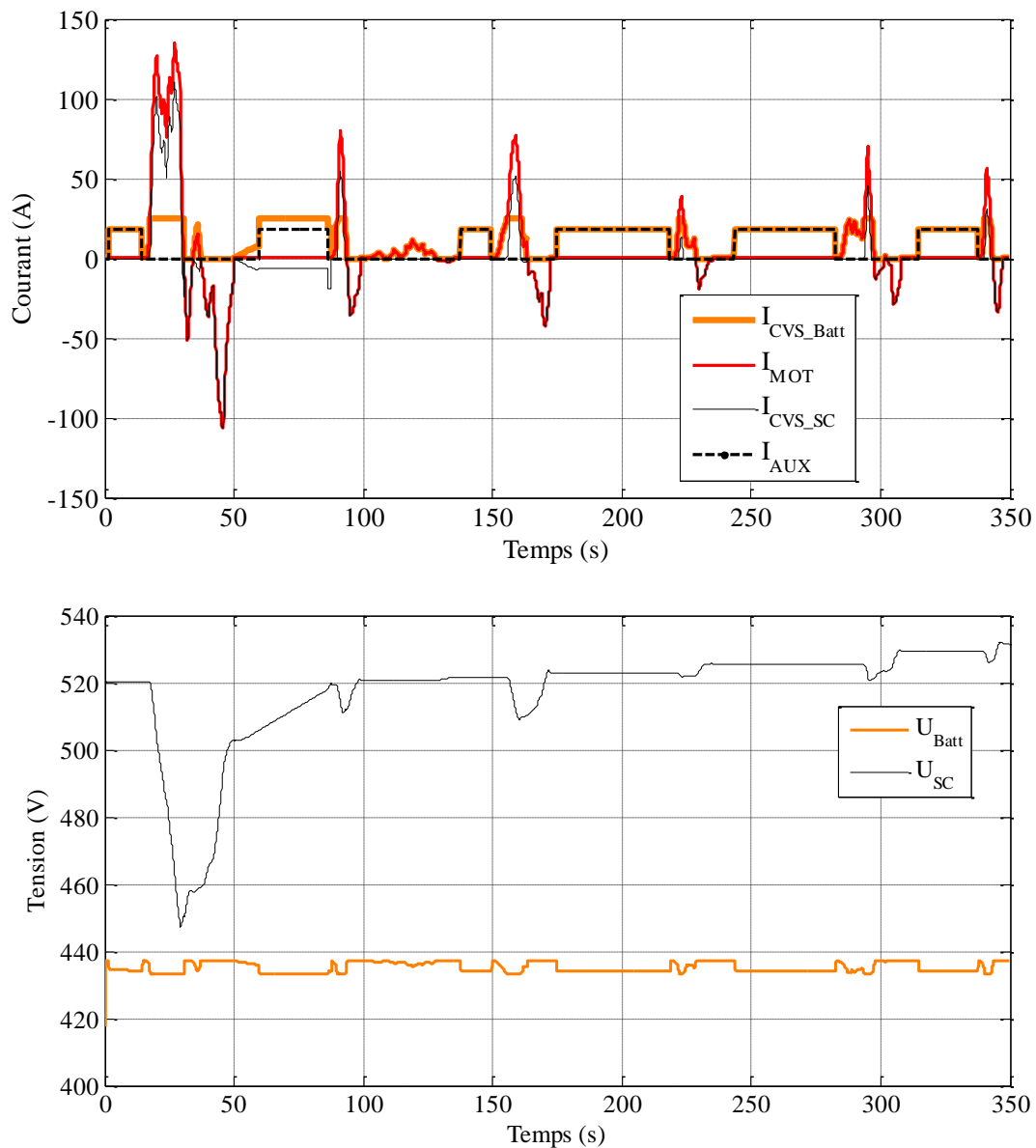


Figure 31 : Résultats de simulation pour une limitation de 25A (350 premières secondes du cycle) avec un pack de supercondensateurs de 15F/540V avec la batterie à 100% SoC

Si la taille du pack de supercondensateurs est sous dimensionnée, le pack batterie devra alors fournir ou recevoir un courant beaucoup plus important. Sur la Figure 32, la taille du pack de supercondensateurs a volontairement été sous dimensionné (de 15F à 1.5F) pour mettre en avant les pics de courant en charge et décharge que doit alors fournir la batterie. Il est à noter la présence d'une multitude d'instant où le pack de supercondensateurs n'est plus en mesure d'assister la batterie car sa tension a atteint un de ses extrêmes (540V ou 270V). Dans ce cas, le courant efficace de la batterie, côté bus continu, est de 25A.

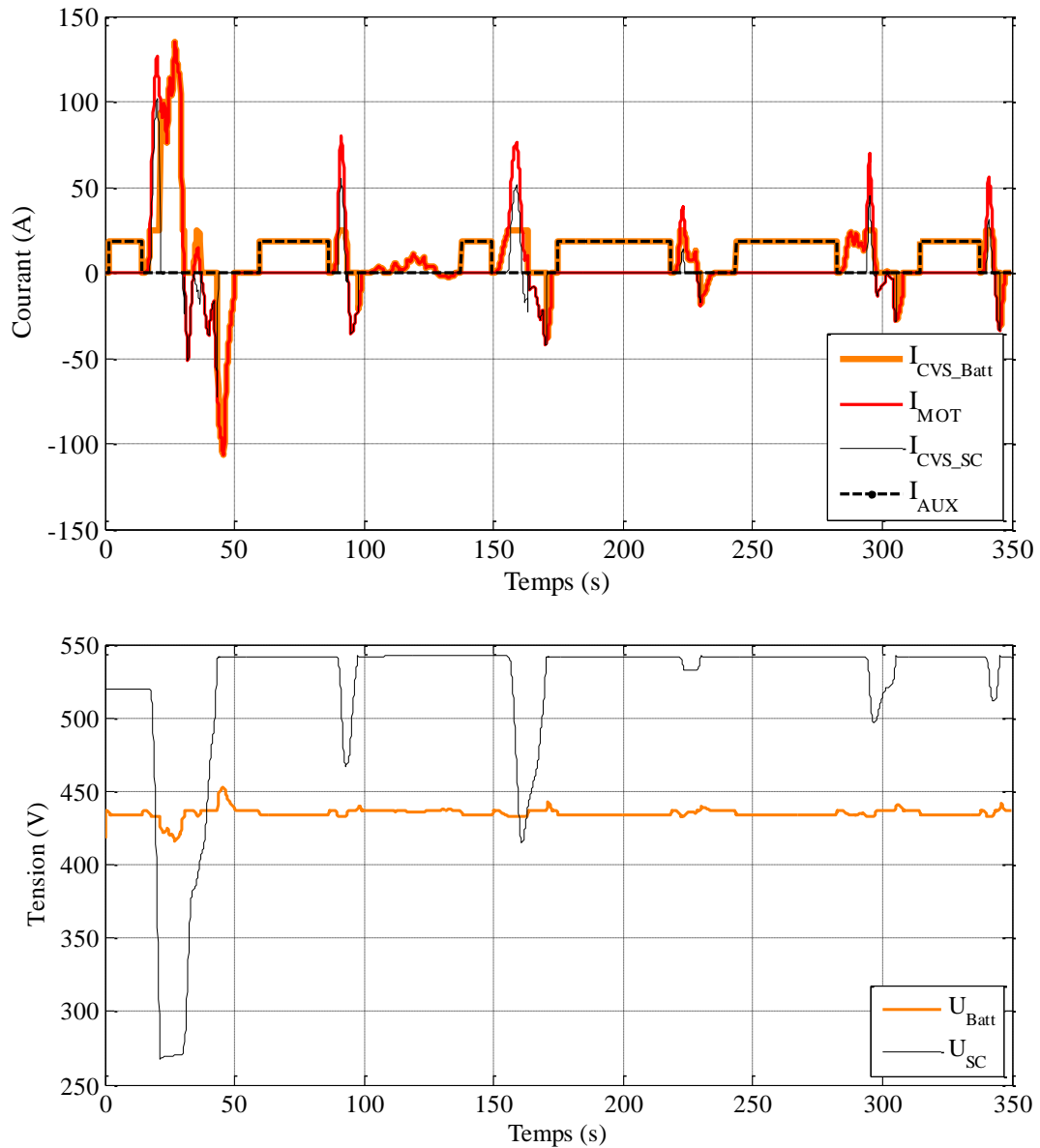


Figure 32 : Résultats de simulation pour une limitation de 25A (350 premières secondes du cycle) avec un pack de supercondensateurs de 1,5F/540V avec la batterie à 100% SoC

Pour continuer le raisonnement, nous montrons dans la figure suivante la simulation de la BOM alimentée par la batterie seule – sans assistance des SC. Il est à noter que la batterie doit fournir et absorber des courants très importants (a valeur efficace du courant de la batterie I_{CVS_Batt} étant de 34A). Le fait le plus remarquable sur cette figure est le courant de 120A que la batterie doit accepter en charge à $t=48s$. Ce modèle simple de batterie indique que la batterie est capable d’accepter ce courant à n’importe quel état de charge mais, comme nous le verrons dans le chapitre 3, la pratique montre une dissymétrie de la batterie au plomb en charge et en décharge. Ce point très important montre la limite du modèle E-r de la batterie.

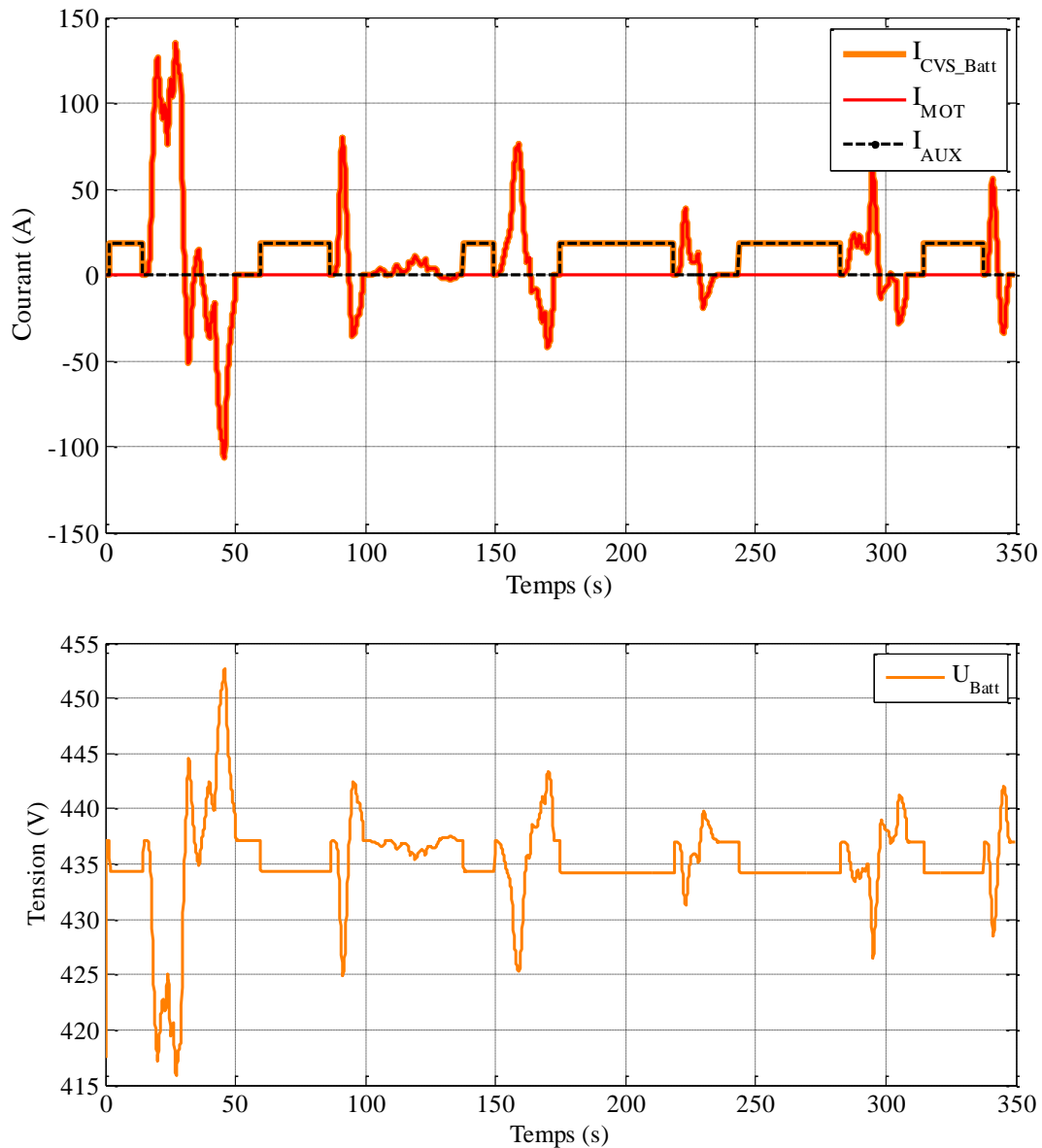


Figure 33 : Résultats de simulation pour une batterie non assistée à 100% SoC

Du point de vue de la consommation énergétique, nous constatons qu’il n’y a pas d’apport significatif du stockage mixte. Le système avec ou sans SC consomme quasiment la même énergie (Figure 34). Ce résultat n’est pas surprenant car les modèles utilisés n’intègrent pas les limitations physiques des sources.

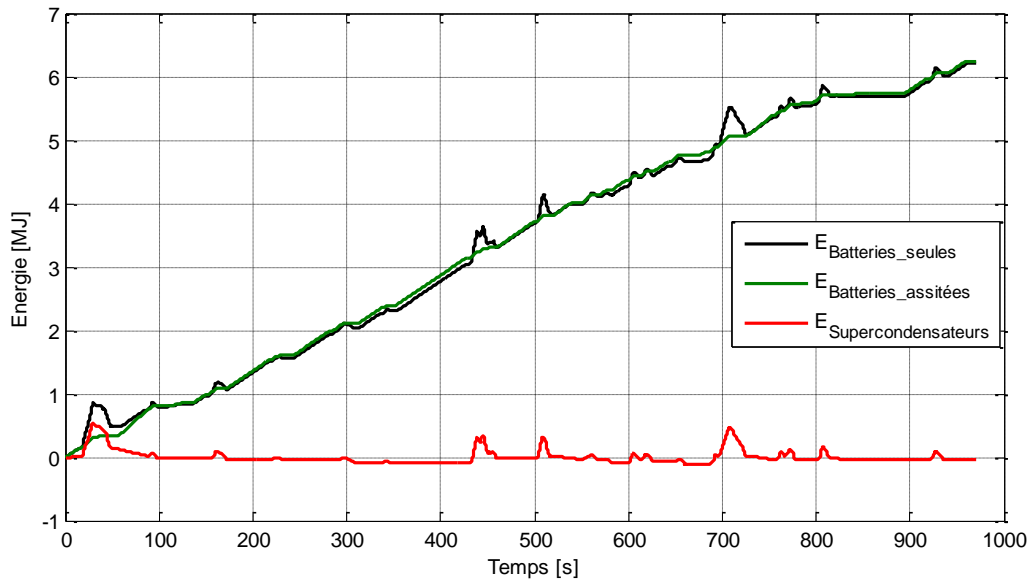


Figure 34 : Energie consommée avec des batteries assistées ou non

Dans la suite du chapitre nous allons étudier l'influence du freinage électrique sur le courant circulant sur le bus continu et sur l'énergie consommée par le véhicule. Comme nous allons limiter l'étude sur le bus continu, la répartition de ce courant entre les deux sources d'énergie n'est pas analysée.

Sur la Figure 35, la limitation du couple maximum autorisé en freinage, au niveau de la machine électrique, permet de faire varier le pourcentage de freinage électrique par rapport au freinage mécanique. A la fin de la simulation, l'énergie dissipée par les freins mécaniques et l'énergie récupérée par la machine électrique sont calculées par simple intégration. L'énergie fournie par la batterie, pour la phase de collecte, varie linéairement d'une valeur de 3kWh pour un freinage 100% mécanique à 2,2kWh pour un freinage 100% électrique, soit une réduction de la consommation du véhicule de 26%. L'énergie du freinage mécanique est dissipée en chaleur, donc perdue.

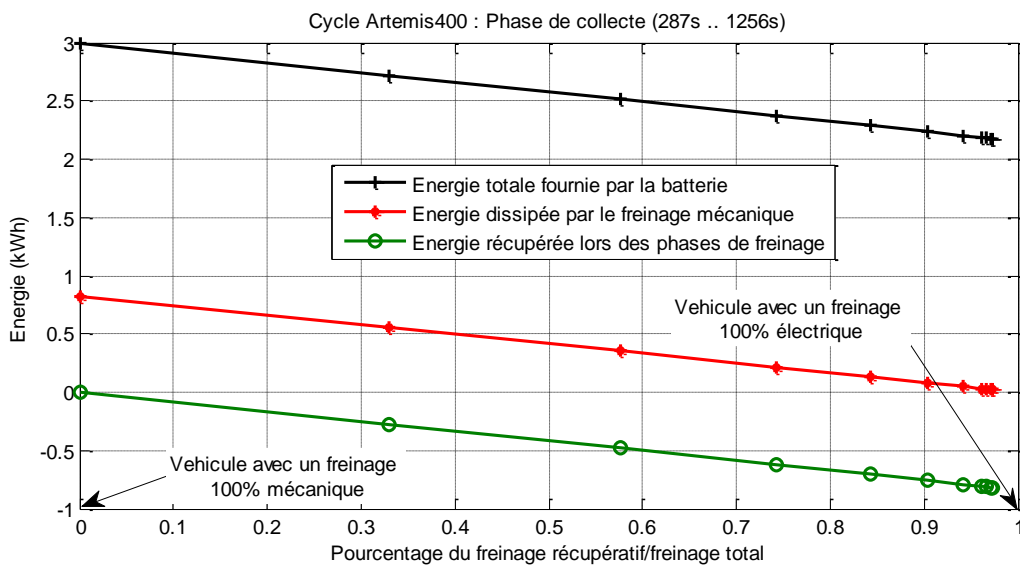


Figure 35 : Evolution des énergies en fonction du freinage récupératif

Avec ce modèle de véhicule, l'énergie récupérée par le freinage électrique représente presque 100% de l'énergie récupérable – sur la Figure 35, pour un freinage 100% électrique, l'énergie perdue dans les freins atteint presque le zéro. Le peu d'énergie dissipée dans les freins mécaniques (3%) provient des instants pendant lesquels le couple de la génératrice électrique est limité. Avec ce modèle, aucune limitation des sources d'énergie n'est prise en compte.

Après avoir vu l'influence de la proportion du freinage électrique sur l'énergie consommée, c'est l'influence de la répartition du freinage sur le courant obtenu dans le bus de puissance qui est présenté sur la Figure 36. Nous constatons que le courant $I_{BUS,max}$, qui représente la valeur maximale du courant bus I_{BUS} , n'est pas influencé par le pourcentage de freinage électrique du véhicule. Le courant efficace circulant dans le bus continu varie lentement de 35A jusqu'à atteindre 40A, l'augmentation observée étant faible. Le courant minimum $I_{BUS,min}$ varie évidemment le plus, de 0A jusqu'à atteindre une valeur de -160A pour un freinage 100% électrique. Cela montre que la récupération de l'énergie électrique se fait au prix des courants élevés. Ces valeurs minimales et maximales aident dans la conception des convertisseurs statiques de puissance qui interfacent les SC et les batteries avec le bus continu.

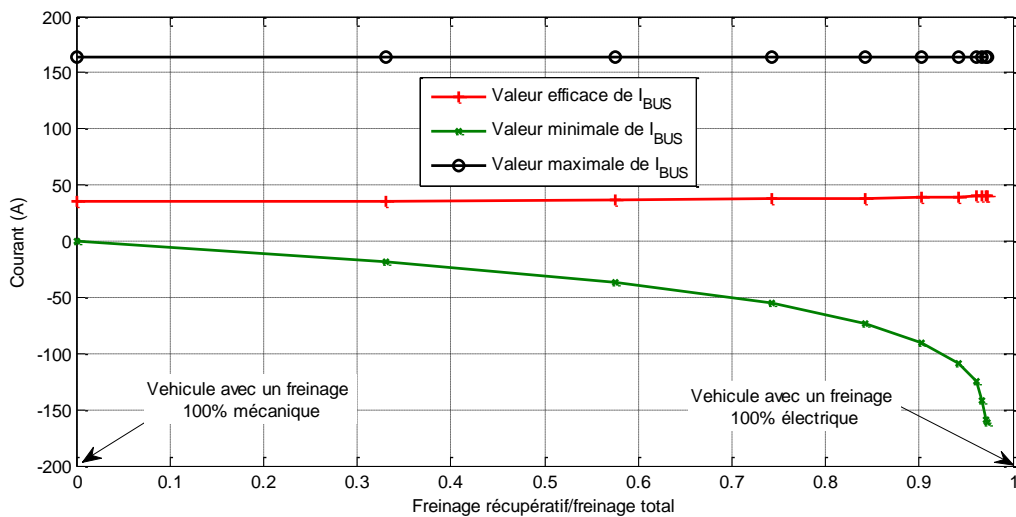


Figure 36 : Evolution des courants en fonction du freinage électrique

2.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons montré la modélisation de la benne à ordures ménagères. Des modèles simples ont été utilisés pour la chaîne de traction ainsi que pour le stockage mixte.

Une procédure de prédimensionnement nous a permis de renseigner les valeurs des packs de batteries et de supercondensateurs. Cette procédure est basée sur la connaissance du profil en puissance de la mission et de la loi de gestion du flux de puissance entre les sources du stockage mixte. La loi de gestion du flux de puissance se base sur la limitation du courant dans la batterie par le courant fourni par les supercondensateurs. Une valeur du courant de limitation de la batterie est aussi obtenue par la même procédure de prédimensionnement.

La simulation de la benne à ordures ménagères a mis en évidence plusieurs points. D'abord l'importance du freinage électrique sur le dimensionnement du stockage. Environ un tiers de l'énergie consommée peut être récupérée si nous arrivons à stocker et réutiliser toute l'énergie cinétique disponible.

La simulation a fait ressortir aussi une diminution du courant efficace circulant dans la batterie en fonction de la qualité de l'association batteries – supercondensateurs (en fonction du courant maximal imposé dans la batterie mais aussi en fonction de la taille du stockage des supercondensateurs). Un courant efficace réduit diminue les pertes joules, l'échauffement, et augmente, a priori, la durée de vie des batteries.

Même si le courant efficace de la batterie est réduit, la simulation montre qu'il n'y a pas de réduction de la quantité d'énergie consommée par une benne utilisant un stockage mixte par rapport à la quantité d'énergie consommée par une benne alimentée par une batterie seule. Ce résultat surprenant est dû aux modèles simples utilisés, notamment pour la batterie.

Un modèle de batterie au plomb, plus fin et qui tient compte de la limitation du courant de charge en fonction de l'état de charge de la batterie, sera proposé dans le chapitre suivant.

3 Modélisation fine de la batterie au plomb et dimensionnement du stockage mixte.

Pour réaliser une bonne modélisation de la batterie au plomb, il faut étudier le fonctionnement interne de la batterie. La compréhension des réactions chimiques principales et secondaires permet une modélisation plus fine de la batterie au plomb.

3.1 Introduction

Inventée par Gaston Planté en 1859, la batterie au plomb était constituée de deux plaques de plomb pures. Ces plaques de plomb étaient enroulées sur elles même (Figure 37 a) et associées en série pour augmenter la tension nominale de la batterie, ou parallèle pour augmenter la capacité équivalente de la batterie (Figure 37 b). Après un certain nombre de cyclage de formation (rodage), la batterie pouvait stocker de l'énergie électrique sous forme chimique. Ensuite en 1880, Émile Alphonse Faure inventât une nouvelle méthode de fabrication, les plaques de plomb pures sont remplacées par des grilles associées à de l'oxyde de plomb. Cette nouvelle méthode permet une meilleure industrialisation et d'obtenir de meilleures performances électriques.

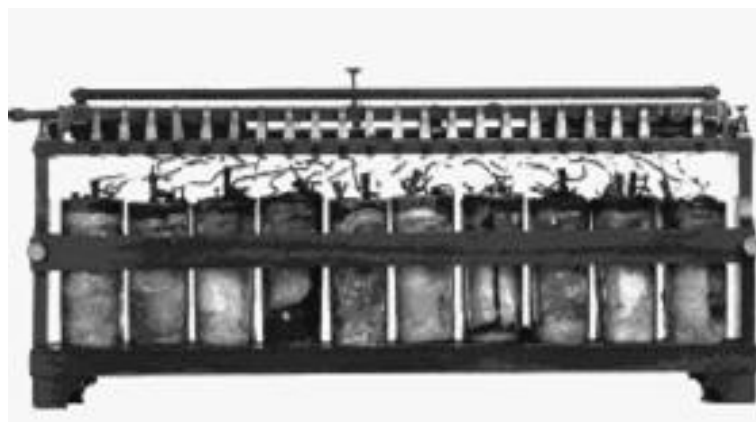
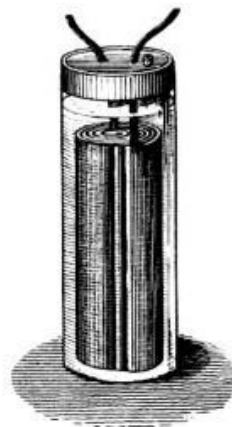


Figure 37 : Batterie de Planté a) Cellule unitaire b) Batterie de Planté

Quelque soit la technologie employée pour la batterie, une cellule élémentaire est constituée d'électrodes positives et négatives isolées électriquement par un séparateur microporeux et immergées dans un électrolyte. Cette cellule élémentaire a une tension nominale de 2V et une capacité massique de 2Ah/kg à C/1, dans notre cas. Ces cellules élémentaires sont ensuite associées en série et en parallèle pour former une batterie au plomb de 6V, 12V ou de 24V.

Il existe deux grandes familles de batterie au plomb : les batteries ouvertes (batteries avec des orifices supérieurs pour recharger la batterie en eau) et les batteries dites étanches (aussi appelées à recombinaison de gaz). Les batteries dites ouvertes ont une meilleure durée de vie (jusqu'à 20 ans) que les batteries dites étanches. Lors de la recharge d'une batterie au plomb, une électrolyse de l'eau (décomposition de l'eau en gaz dihydrogène et dioxygène) se produit. Pour les batteries ouvertes, les gaz s'échappent par les orifices placés dans la partie supérieure de la batterie, ce qui constitue une perte en eau (un rechargement en eau doit être mis en place). Pour les batteries étanches, ces gaz sont automatiquement recombinaisonnés en eau et la quantité d'eau reste constante dans la batterie.

3.1.1 La fabrication

Dans la batterie de type Faure, les électrodes sont fabriquées à partir d'une grille d'alliage de plomb et d'une pâte à base d'acide sulfurique et de plomb pure (ajout d'oxyde de plomb en poudre pour l'électrode positive). Le choix du matériau pour la grille est limité car il faut qu'elle soit inerte dans ce milieu fortement acide et il ne faut pas non plus qu'elle « empoisonne » la batterie (dégradation significative et rapide des caractéristiques de la batterie). La solution est une grille en alliage de plomb qui fasse office de collecteur électrique et de squelette pour l'électrode.

Dans la technologie dite « à plaques planes », une électrode est un ensemble de plaques identiques connectée entre elles en parallèle. Cette disposition permet d'intercaler la plaque du potentiel opposé dans l'espace existant entre deux plaques de même potentiel (Figure 38). Les séparateurs microporeux sont insérés entre chaque électrode pour éviter tout contact électrique entre celles-ci. L'électrolyte est quant à lui soit liquide (batterie ouverte - flooded battery), soit gélifié (batterie étanche - Gel VRLA : Valves Regulated Lead-Acid battery) ou soit absorbé par le séparateur (VRLA AGM : Absorbed Glass Mat separator battery). La cellule élémentaire de la batterie est le regroupement des plaques positives, négatives et des séparateurs. Par exemple, une batterie de 12V (constituée de 6 cellules élémentaires de 2V connectées en série) est fabriquée à partir d'un container (en PVC, en ABS ou en Polypropylène) ayant 6 alvéoles isolées électriquement (Figure 38).

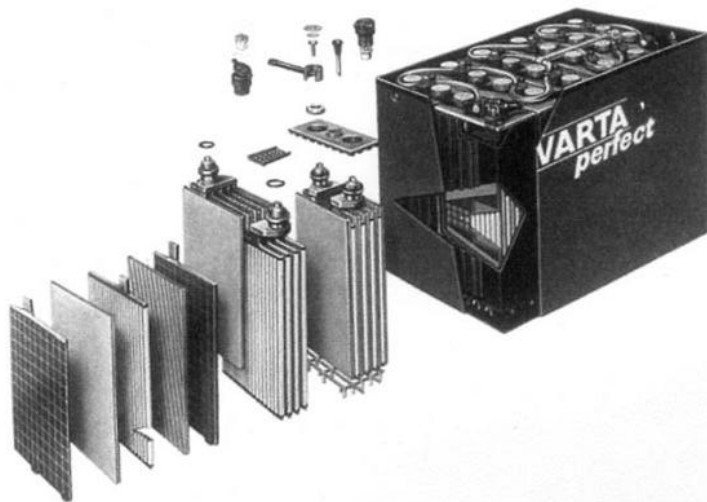


Figure 38 : Batterie industrielle [Robert, 2004]

La technologie dite « à plaques tubulaires » concerne seulement les électrodes positives, alors que l'électrode négative est toujours de type plane (voir Figure 39). Une électrode est constituée de plusieurs tubes d'alliage de plomb liés entre eux par un connecteur en plomb. Ce tube est composée d'une aiguille centrale d'alliage de plomb entouré par de la matière active et le tout ceinturé par une gaine en fibre de verre qui permet un maintien optimal de la matière active lors des phases de charge et de décharge profonde de la batterie. La tige de l'électrode est le collecteur électrique et en même temps son squelette. De telles électrodes sont robustes et peu susceptibles de se désagréger. Elles sont réservées aux batteries industrielles (traction lourde, manutention, applications stationnaires...).

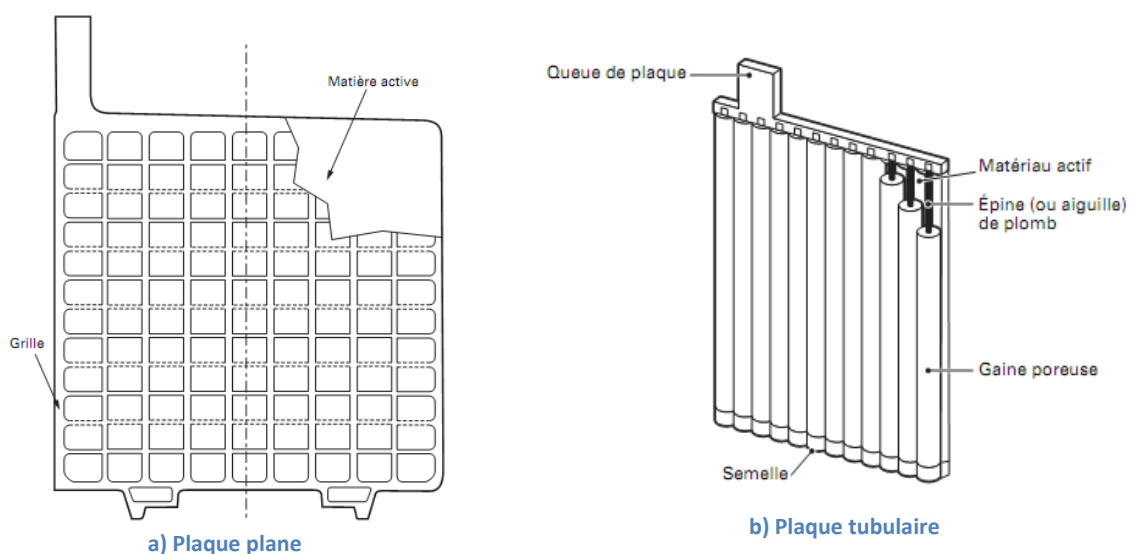
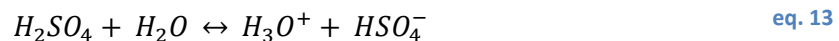


Figure 39 : Les deux types d'électrode positive

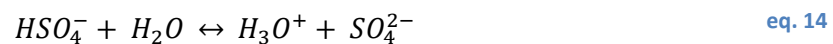
3.1.2 Réaction chimique principale

L'acide sulfurique contenu dans la batterie a deux buts : c'est le conducteur ionique de la batterie et il participe aussi aux réactions chimiques se produisant au voisinage des électrodes. En solution aqueuse, l'acide sulfurique est un diacide qui se dissocie en deux étapes, il en résulte une grande variété d'espèce contenue dans l'électrolyte. La concentration des espèces dépend directement du pH de la solution mais du fait d'un pH élevé dans la batterie, la solution est essentiellement constituée d'ion H_3O^+ et HSO_4^- .

— première dissociation :



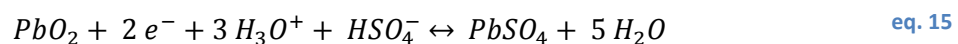
— deuxième dissociation :



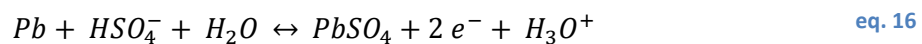
Les réactions chimiques se produisant au niveau des électrodes sont des réactions d'oxydoréduction. L'oxydoréduction est une réaction chimique dans laquelle il y a un transfert d'électrons. L'espèce chimique qui capte les électrons est appelée « oxydant » et l'autre espèce qui en cède est appelée « réducteur ». Dans une batterie au plomb, l'électrode positive qui est constituée d'oxyde de plomb est le réducteur lors de la décharge et l'électrode négative est l'oxydant. L'électrode où a lieu l'oxydation est appelée anode et celle où a lieu la réduction, la cathode.

Dans ces conditions, les réactions aux électrodes s'écrivent :

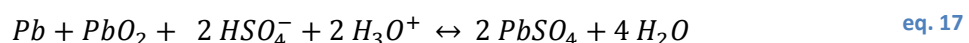
— pour l'électrode positive (réaction vers la droite = décharge) :



— pour l'électrode négative (réaction vers la droite = décharge) :



Dont il résulte la réaction globale (réaction vers la droite = décharge) :



Le sulfate de plomb formé est insoluble, ce qui permet la réversibilité de la réaction (eq. 17). Cette représentation chimique ne met pas en avant les réactions chimiques intermédiaires. Les réactions intermédiaires sont décrites sur la Figure 40.

Lors de la décharge, au niveau de l'électrode positive, l'oxyde de plomb se sépare et s'oxyde par l'ajout de deux électrons. Il se scinde alors en deux ions : l'ion plomb Pb^{2+} et deux ions oxygènes O^{2-} . Ces deux ions se recombinent avec d'autres ions, contenus dans l'électrolyte, pour former de l'eau H_2O qui est l'association de l'ion oxygène O^{2-} et l'ion hydronium H_3O^+ et le sulfate de plomb $PbSO_2$ qui est l'association de l'ion plomb Pb^{2+} et de l'ion sulfate SO_4^{2-} . Au niveau de l'électrode négative, Le plomb est réduit et il est transformé en un ion plomb Pb^{2+} qui se recombine avec l'acide sulfurique SO_4^{2-} pour précipiter en sulfate de plomb $PbSO_2$.

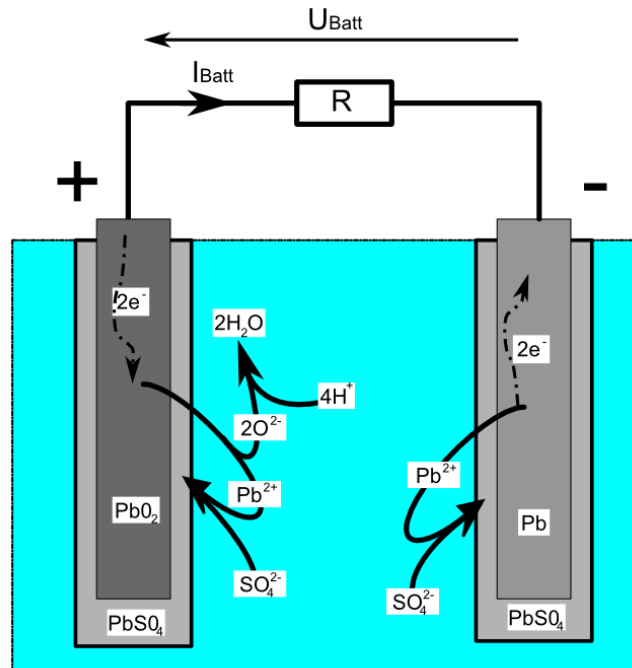


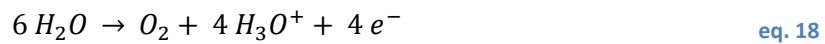
Figure 40 : Réactions intermédiaires

Lors de la recharge, une tension suffisamment importante est appliquée à la batterie et la réaction chimique s'inverse. L'électrode positive devient alors l'oxydant et l'électrode négative devient le réducteur. Lors de la phase de recharge la totalité de la matière retrouve sa forme d'origine et la batterie est dans sa forme initiale.

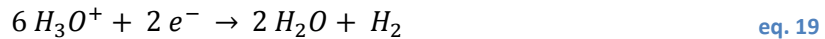
3.1.3 Réaction chimiques secondaires

Les réactions chimiques secondaires sont des réactions chimiques non-désirées se produisant tout au long de la vie de la batterie au plomb. La plus connue des réactions secondaires est l'électrolyse de l'eau qui provoque un dégagement de dioxygène et de dihydrogène au niveau des électrodes. L'électrolyse de l'eau apparaît dès que la tension entre les électrodes est supérieure au potentiel standard de 1,229 V. Le potentiel standard est une tension ayant pour référence le couple proton hydrogène (ayant une tension nulle par convention). Cette réaction chimique est toujours présente dans une batterie au plomb car la tension entre les électrodes est toujours comprise entre 1,75V et 2,4V. Cette réaction chimique est heureusement lente et elle correspond à une autodécharge de la batterie ayant un courant de fuite de l'ordre de $C/100$.

Le dégagement gazeux se produisant au niveau de l'électrode positive est du dioxygène.



Le deuxième dégagement gazeux se produisant au niveau de l'électrode négative est du dihydrogène :



La réaction globale se produisant dans l'ensemble de la cellule peut être écrite de la façon suivante :



Lors de la recharge des batteries ouvertes, il y a une perte d'eau. Il faut alors recharger cette batterie en eau lors de sa maintenance préventive. Dans les batteries à recombinaison de gaz, seul 2% à 3% des gaz de dihydrogène et de dioxygène ne sont pas retransformés en eau lors de la recharge. Les batteries VRLA ne peuvent pas être rechargées en eau, la batterie fonctionnera alors sur la quantité d'eau incorporée lors de sa fabrication.

Les autres réactions secondaires sont, par exemple, la corrosion des grilles des électrodes, l'empoisonnement de la batterie par une impureté introduite lors de la fabrication (fer, antimoine sur l'électrode négative...) et stratification de l'électrolyte dans les électrodes. La batterie est considérée défectueuse lorsqu'une ou plusieurs réactions secondaires ont pris trop d'ampleur dans la batterie. Du point de vue de l'extérieur, une batterie est considérée défailante quand elle a perdue 20% de sa capacité de stockage initiale ou qu'elle n'est plus capable de fournir un certain courant (courant de démarrage des voitures thermiques) ou alors qu'elle a une tension nominale très faible (exemple d'un court-circuit d'une cellule élémentaire).

La corrosion de la grille intervient tout au long de l'utilisation de la batterie. Sur la Figure 41, la corrosion de la grille est clairement identifiable sur la photo et le schéma décrit l'évolution de la corrosion à l'interface grille et la matière active. Lors des cycles de charge et de décharge de la batterie, une partie de la grille de l'électrode positive s'oxyde, et il devient de l'oxyde de plomb. La section initiale de la grille diminue au fil des charges et décharges jusqu'à disparaître (Figure 42).

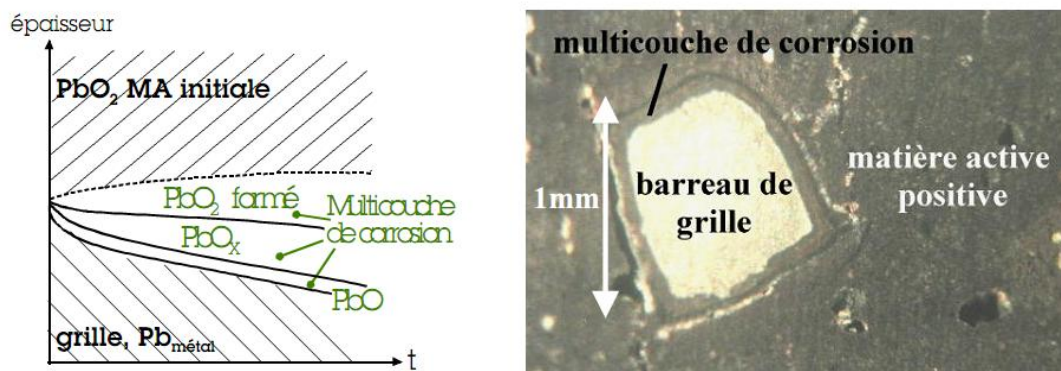


Figure 41 : L'oxydation de la grille en début de vie [Dillensenger, 2004]

La suppression de la surface active de la grille entraîne une augmentation de la résistance interne de la batterie et fragilise l'électrode positive. La batterie est alors plus difficilement rechargeable car certaines zones de la grille ne sont plus accessibles.

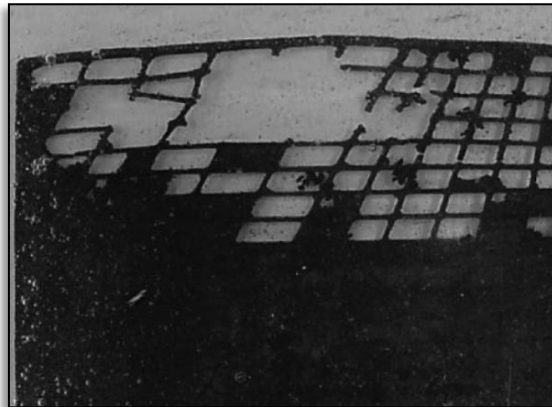


Figure 42 : La corrosion de la grille [Ruetschi, 2004]

Un second problème est la sulfatation des électrodes. Certains travaux montrent qu'il est possible de dé-sulfater une batterie au plomb et de retrouver environ 85% de la capacité nominale de la batterie [Karami, 2009]. Les techniques se basent sur la fréquence de résonance de la batterie [Jossen, 2006], une recharge avec des créneaux de courant [Karami, 2009] ou alors une recharge de la batterie sous une tension importante conseillée par le constructeur de batteries Enersys.

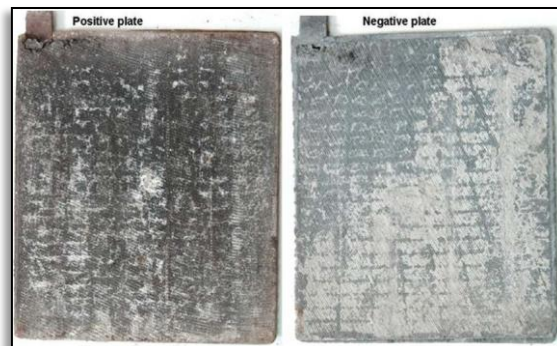


Figure 43 : Deux électrodes sulfatées [Karami, 2009]

Le dernier point est l'électrolyse de l'eau qui peut être fatale à la batterie. Lorsque l'eau de la batterie disparaît lors de l'électrolyse, une partie des électrodes n'intervient plus lors des cycles car elle n'est plus en contact avec l'acide sulfurique. Le pH de l'électrolyte augmente aussi car la quantité d'eau diminue dans la solution d'acide sulfurique. L'augmentation du pH entraîne une plus forte corrosion de la grille.

3.1.4 Additifs

Les additifs sont des matériaux inclus lors de la fabrication de la batterie afin d'améliorer la solidité des grilles, d'améliorer les performances de stockage de la batterie (capacité) mais aussi afin de diminuer la consommation en eau de la batterie. Il est recensé dans le Tableau 12 les principaux champs d'application des batteries en fonction de leurs alliages. Une grille conventionnelle est composée d'un alliage de plomb et de 8% d'antimoine. L'antimoine augmente la coulabilité et l'adhérence de la pâte de plomb. Malheureusement, l'antimoine corrode l'électrode positive et se dépose sur l'électrode négative, ce qui entraîne une diminution de la tension de seuil de l'hydrogène. Cette batterie doit avoir une maintenance préventive plus régulière pour compenser la perte en eau due à l'électrolyse de l'eau. Il existe alors une solution qui consiste à diminuer la concentration en antimoine de la grille pour ralentir la réaction d'électrolyse.

Les batteries sans maintenance sont composées d'un alliage de plomb/calcium. La tension d'électrolyse de l'eau est alors plus importante. Lors de la charge, la perte en eau de la batterie est alors diminuée uniquement si la tension maximale de la batterie est respectée. Cette batterie est surtout utilisée en maintien de charge (floating) c'est à dire elle est utilisée dans l'automobile actuelle et le stationnaire.

Alliage	Avantages	Inconvénients	Champ d'application et type de batterie fabriquée
Antimoine 4% à 11% Sb	Grilles solides, stabilité de la matière active dans l'électrode positive, augmentation du cyclage de la batterie	augmentation de l'électrolyse de l'eau	Traction
Faible concentration d'Antimoine 0,5% à 3,5% Sb	Diminution de la contamination en antimoine de l'électrode négative	stabilité de la capacité lors de la charge, préservation du gain en cyclage	Faible maintenance, batterie de démarrage
Calcium 0,06 à 0,12% Ca	Pas de contamination de l'électrode négative par l'antimoine	réduction de la capacité de la batterie, grossissement de la grille	Stationary, Batteries ouvertes et VRLA, batteries de démarrage
Plomb pur	Performance en décharge profonde	matière tendre	Batteries Planté, Batterie avec les cellules enroulées sur elles-mêmes (BELL Linage 2000)
Antimoine/Cadmium 1,5%Sb et 1,5% Cd	Faible dispersion de l'antimoine	Toxicité du cadmium	Batteries VRLA

Tableau 12 : Comparatif des alliages utilisés

3.1.5 La recharge d'une batterie au plomb

Une batterie est considérée en recharge lorsqu'une tension est appliquée à ses bornes et que circule un courant suffisamment important qui permette de compenser l'autodécharge de la batterie (c'est à dire compenser le courant de fuite provoqué par les réactions secondaires de la batterie) et qui permette aussi de retransformer la matière active de la batterie vers son état initial.

En charge, le phénomène prépondérant dans la batterie est la reconstitution d'acide sulfurique au sein des électrodes. Il en résulte une forte consommation en eau et la présence d'une solution fortement acide au niveau des électrodes. L'acide concentré suinte et glisse alors vers le fond de la batterie.

Après une décharge profonde et à partir de 80% de recharge, l'électrolyte est "stratifié", c'est-à-dire que la partie basse des éléments contient de l'électrolyte concentré et la partie haute de l'électrolyte dilué. Il faut absolument continuer la recharge de la batterie pour homogénéiser les électrodes sinon il y aura une fatigue rapide de la partie basse de l'électrode.

Au fur et à mesure de la charge de la batterie, les réactions de recharge des matériaux actifs sont de plus en plus difficiles d'accès (raréfaction des cristaux de sulfates) et la réaction d'électrolyse de l'eau devient alors prédominante. Cette phase est très importante pour la durée de vie de la batterie car elle permet une homogénéisation des électrodes et de l'électrolyte et elle permet aussi de finir la recharge des derniers pourcent de matière active.

Il existe plusieurs méthodes de charge des batteries au plomb. Les deux grandes méthodes sont la recharge rapide et la recharge à courant constant (régulation en tension maximale). La **charge rapide** permet comme son nom l'indique de recharger la batterie en un minimum de temps, soit environ 5h. Lors de la recharge, la tension aux bornes de la batterie est régulée à sa tension maximale (14,28V) et le courant dans la batterie n'est pas limité. Dans le cas d'un pack de batterie, il faudra étudier le refroidissement de celui-ci car les batteries vont générer des pertes thermiques non-négligeables. La méthode de la charge à courant constant tension constante (**Constant Current Constant Voltage**) permet de limiter les pertes thermiques lors de la charge. Le courant de recharge est limité à une valeur de $C/10$ - $C/5$ et sa tension augmente au fil de la recharge. Elle est ensuite régulée à la valeur de la tension maximale de la batterie. Son point faible est le temps de recharge de la batterie qui est très importante comparée au temps de la recharge rapide.

3.1.6 La décharge des batteries au plomb

Une batterie est considérée en décharge lorsqu'un flux d'électrons sort de la borne négative de la batterie. Quand une charge est connectée à la batterie, la différence de potentiel existant entre ses bornes crée un courant circulant à travers la charge. Les réactions secondaires de la batterie peuvent être modélisées par un courant de fuite interne à la batterie, ce courant est appelé courant d'autodécharge de la batterie. Donc une batterie même sans charge connectée à ses bornes est toujours en train de se décharger.

Pendant la décharge, les ions sulfate actifs sont ceux situés à proximité de l'interface réactionnelle et donc contenus dans le volume poreux de l'électrode. Ces ions sulfate se lient aux ions Pb^{2+} , produits par la réaction de décharge, pour former du sulfate de plomb insoluble qui cristallise dans les pores. Le pH de l'électrolyte diminue lors de cette décharge car les ions H_3O^+ s'associent à la matière active des électrodes pour donner du sulfate de plomb.

Tout au long de la décharge, les conditions de la réaction se dégradent sous l'effet de la cristallisation du sulfate de plomb qui fait chuter la concentration des réactifs au voisinage des électrodes, fait progressivement décroître la surface d'échange (le sulfate de plomb est un isolant électrique) et fait augmenter le volume de l'électrode.

Face à ces trois processus qui se conjuguent pour dégrader les conditions de la décharge, la diffusion qui agit de l'électrolyte vers l'intérieur des électrodes atténue la vitesse de la dégradation. Cette diffusion est lente, et plusieurs heures sont nécessaires pour en obtenir une efficacité maximum.

Lors d'une décharge profonde, la concentration en sulfate de plomb augmente dans les électrodes positive et négative. Cette augmentation entraîne alors une augmentation du volume des électrodes et une augmentation de la résistance interne de la batterie. Pour garantir un nombre important de cycles de la batterie, il faut alors limiter cette décharge pour minimiser cet effet sur les électrodes. La limite basse lors de la décharge est une tension minimale en tension qui est l'image du pH de l'électrolyte de la batterie (eq. 26).

3.2 Etat de l'art des modèles de batterie au plomb

Il existe deux principales méthodes pour modéliser finement une batterie au plomb. La première méthode consiste à utiliser les lois de l'électrochimie qui permettent après caractérisation des espèces, d'obtenir une bonne précision. La deuxième méthode repose sur le modèle à constantes localisées qui permet d'affecter à chaque réaction chimique une impédance. Le modèle à constantes localisées est le plus utilisé et le plus simple à comprendre pour les personnes du génie électrique.

3.2.1 Grandeurs électriques

La capacité de la batterie

La capacité nominale de la batterie est la quantité de charge électrique que peut restituer une batterie après une charge complète. La capacité nominale, exprimée en [Ah], est calculée par intégration du courant circulant dans la batterie pendant une décharge complète.

$$Q = \int_0^t I_{Batt}(t) dt \quad \text{eq. 21}$$

La notation pour une capacité nominale est écrite de la façon suivante : C_h avec h le nombre d'heure de décharge. Le courant de décharge de la batterie est aussi noté $\frac{C_h}{n}$ avec n le temps de décharge à courant constant. Le temps de décharge de référence est fixé par des normes : 5h pour une batterie de traction, 10h pour une batterie stationnaire et 20h pour une batterie de démarrage [Scordia, 2004].

L'énergie interne de la batterie

Cette énergie représente l'énergie restituée par la batterie pendant la décharge. Elle s'exprime en [Wh]. Cette grandeur est plutôt utilisée pour la conception de système dans sa globalité (études de véhicule, de système stationnaire, etc.).

$$E = \int_0^t U_{Batt}(t) I_{Batt}(t) dt \quad \text{eq. 22}$$

L'état de charge de la batterie

Cette grandeur représente la quantité de charge restante dans la batterie. Il existe plusieurs méthodes pour estimer un état de charge d'une batterie mais ces techniques sont plus ou moins précises.

$$SoC = 1 - \frac{Q}{C_h} \quad \text{eq. 23}$$

Il est assez difficile d'estimer l'état de charge d'une batterie. Il existe plusieurs méthodes d'estimation de l'état de charge de la batterie, les méthodes en ligne étant généralement moins précises que les méthodes hors ligne :

Méthodes	Champ d'application	Avantages	Inconvénients
Test de décharge	Toutes les batteries <i>Détermination de la capacité initiale de la batterie neuve</i>	Facile et précis, indépendant de l'état de santé de la batterie	Cher, coûteux en temps, modification de l'état de charge, pertes joules
Comptage des Ah	Toutes les batteries <i>La plupart des applications utilisent cette méthode</i>	Solution en ligne, précise si réétalonnage régulier	Besoin d'un modèle de pertes, sensibilité aux réactions secondaires, coûts importants pour améliorer la précision, besoin de rééquilibrage
Suivi de l'électrolyte (concentration, densité, couleur)	Batterie au plomb, possible pour les batteries Zn/Br	Solution en ligne et donne une information sur l'état de santé de la batterie	Erreur du fait de la stratification de la réaction, stabilité du capteur, sensibilité à la température et aux impuretés
Tension à vide	Batterie au plomb, possible pour les batteries Zn/Br, Li-ion et NiMH	Solution en ligne, pas cher	Faible dynamique, besoin d'un long temps de repos, parasitage du fait des réactions secondaires
Modèle linéaire	Batterie au plomb (Photovoltaïque)	Solution en ligne, implantable facilement	Besoin de données pour optimiser les paramètres
Réseaux neuronaux	Toutes les batteries	Solution en ligne	Besoin de données pour optimiser les paramètres
Spectroscopie d'impédance	Toutes les batteries	Donne des informations sur le vieillissement et sur l'état de santé, possibilité de le réaliser en ligne	Coût élevé
Suivi de la résistance interne	Batterie au plomb, NiCd	Donne des informations sur le vieillissement et sur l'état de santé	Bonne précision pour les faibles états de charge
Filtre de Kalman	Toutes les batteries	Solution en ligne, adaptatif	Besoin d'un processeur dédié, besoin d'un modèle adaptatif et problème des paramètres initiaux

Tableau 13 : Comparatif entre les différentes méthodes d'estimation de l'état de charge d'une batterie [Piller, 2001]

Le rendement faradique

C'est le rapport entre le nombre d'Ah restitué pendant la décharge totale de la batterie sur le nombre d'Ah fourni pour recharger totalement la batterie.

$$\eta_{Ah} = \frac{Q_{Décharge}}{Q_{Charge}} \quad \text{eq. 24}$$

Cette variable dépend de nombreux paramètres dont par exemple la température et le taux de décharge.

Le rendement énergétique

C'est un rapport qui est totalement différent du rendement faradique. Cette grandeur est basée sur le rapport des énergies récupérée $E_{Décharge}$ et donnée E_{Charge} à la batterie.

$$\eta_{\text{énergies}} = \frac{E_{Décharge}}{E_{Charge}} \quad \text{eq. 25}$$

3.2.2 Modèles basés sur les lois électrochimiques

En électrochimie, le calcul de la tension caractéristique de la cellule part du principe que le système est au repos depuis un temps infini et la notion de surtension regroupe toutes les chutes ou hausses de tension dues aux réactions chimiques et aux matériaux conducteurs.

3.2.2.1 La tension d'équilibre

La première étape consiste à déterminer la tension caractéristique du couple d'oxydoréduction. La loi de Nernst permet de déterminer la tension à vide d'une cellule, pour différentes concentrations de l'acide. L'équation de Nernst [Robert, 2004], appliquée à la réaction (eq. 17) conduit à :

$$E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{a_{H_2SO_4}}{a_{H_2O}} \right) \quad \text{eq. 26}$$

avec : E^0 le potentiel standard du couple Pb/PbO_2 , $a_{H_2SO_4}$ et a_{H_2O} les activités chimiques de l'acide sulfurique et de l'eau. L'activité chimique correspond aux concentrations actives de la réaction. R la constante molaire des gaz, $F = 96500 \text{ As/mol}$ la constante de Faraday et T la température absolue.

Le calcul de la tension à vide de la batterie impose la connaissance des activités respectives de l'acide sulfurique et de l'eau, pour différentes concentrations. De plus, il faut connaître le potentiel standard de chaque électrode. L'activité chimique d'une espèce dépend de la concentration de l'espèce et de la vitesse avec laquelle se produit la réaction chimique. Le potentiel standard est la tension que produit un couple chimique à une température de laboratoire, à une pression de 1 bar. Le résultat ainsi obtenu est illustré sur la figure suivante, extraite de [Robert, 2004] :

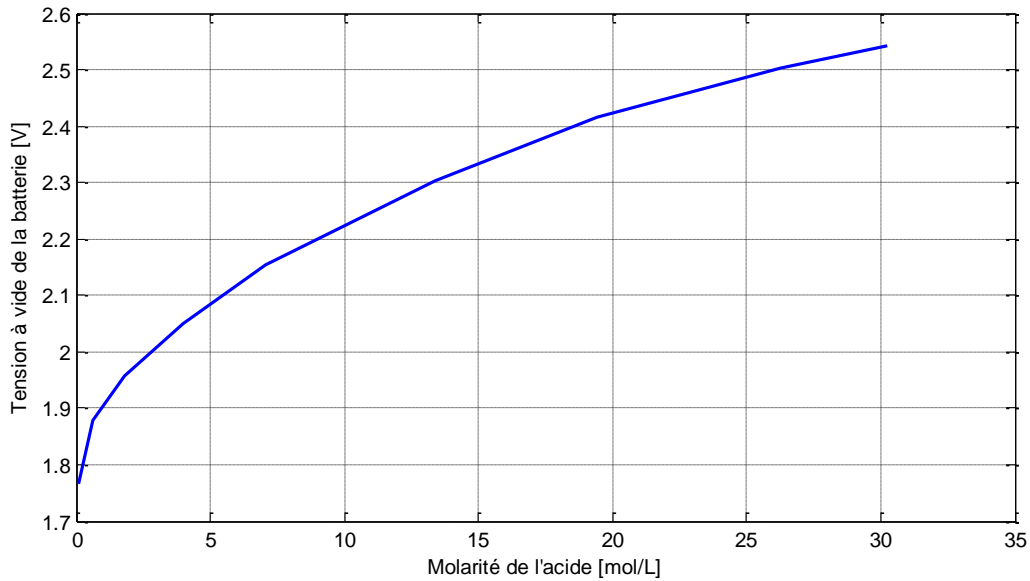


Figure 44 : Tension d'équilibre en fonction de la molarité de l'acide [Robert, 2004]

Une autre méthode permet de connaître la tension d'équilibre de la batterie. C'est une formulation empirique qui lie la tension d'équilibre à la concentration volumique de l'acide sulfurique ρ :

$$E = 0,84 + \rho \quad \text{eq. 27}$$

Surtensions

Après avoir déterminé la tension d'équilibre des batteries, il est important de calculer les surtensions provoquées par les réactions chimiques et de calculer les chutes de tensions ohmiques provoquées par le passage du courant dans les matériaux conducteurs. L'équation 28 permet le calcul de la tension de la batterie en fonction de la surtension et de la tension d'équilibre. E^+ correspond à la tension d'équilibre de l'électrode positive (E^- pour la négative), η^+ correspond à la surtension (positive ou négative) provoquée par les réactions chimiques et r est la résistance des matériaux conducteurs des électrodes :

$$V_{\text{électrode}} = \underbrace{(E^+ - E^-)_{\text{équilibre}}}_{\ominus} + \underbrace{(\eta^+ - \eta^-)}_{\otimes} + \sum r i \quad \text{eq. 28}$$

Dans le Tableau 14 sont résumées les principales lois électrochimiques pour le calcul de la tension de la batterie eq. 28.

Domaine	Phénomènes	Lois chimiques	
⊖ Facteur thermodynamique (courant nul)	Potentiel d'équilibre d'électrode	Loi de Nernst	Diagrammes tension-pH
⊗ Facteurs dynamiques (sous courant)	Surtension d'électrode	Lois de la cinétique électrochimiques : Loi de Butler-Volmer (faible surtension) Loi de Tafel (moyenne surtension) Lois de Fick (forte surtension)	Transfert de charge Diffusion
	Chute ohmique	Lois des solutions électrolytiques : Loi d'Ohm (géométrie de la cellule) Loi de Kohlrausch (électrolyte)	Migration

Tableau 14 : Tableau résumant les différentes lois existantes en électrochimie

Les surtensions sont provoquées par le déplacement d'éléments chimiques dans l'électrolyte. Il apparaît alors un gradient de concentration au voisinage des électrodes et dans l'électrolyte elle-même. Le flux de transport de masse est la somme de trois contributions : la diffusion, la convection et la migration. Elles seront détaillées dans la suite :

- La diffusion est la conséquence d'un gradient de concentration des ions et de matière. Le flux ainsi engendré s'écrit :

$$\varphi_{diff} = -D \text{ grad } C \quad \text{eq. 29}$$

avec D coefficient de diffusion de l'espèce concernée, $\text{grad } C$ gradient de concentration molaire.

- La convection résulte d'une agitation mécanique et /ou thermique. Il concerne également les ions et les molécules. Si la convection est forcée, le flux est plus important que pour une convection naturelle. La relation qui lie la vitesse relative v et la concentration C avec le flux ainsi créé est la suivante :

$$\varphi_{conv} = v C \quad \text{eq. 30}$$

- La migration n'affecte que les ions se déplaçant sous l'effet d'un champ électrique (électrophorèse). Le flux dépend à la fois de la tension u , de la concentration de l'espèce C et aussi du champ électrique $\text{grad } V$:

$$\varphi_{migr} = u C \text{ grad } V \quad \text{eq. 31}$$

Les lois de Fick sont les lois générales de la diffusion. Elles permettent d'évaluer la densité de courant de diffusion au voisinage des électrodes.

$$J|_{diff} = nFD \text{ grad } C \quad \text{eq. 32}$$

avec n est le nombre d'électrons échangés par la réaction, F est la constante de Faraday D est la constante de la diffusion et C est la concentration de l'espèce. À l'interface, le gradient de diffusion s'accroît lorsque l'on augmente la polarisation de l'électrode. Dans cette situation extrême, la densité de courant tend à son tour vers une limite, indépendante de la surtension, et la vitesse de la réaction électrochimique est alors maximale [Darchen, 2010].

Pour les faibles surtensions, la loi de Butler-Volmer (eq. 33) permet de modéliser le transfert de charge. Dans le sens de l'oxydation, cette réaction peut être représentée par un courant i_{ox} et par un courant i_{red} dans le sens de la réduction ($i_{ox} > 0$ et $i_{red} < 0$). Lorsqu'aucun courant ne circule, les deux réactions se compensent (Figure 45).

$$i(E) = i_{ox} + i_{red} = i_{éch} \left\{ \exp \left[\frac{\alpha n F}{RT} (E - E_0) \right] - \exp \left[- \frac{(1 - \alpha) n F}{RT} (E - E_0) \right] \right\} \quad \text{eq. 33}$$

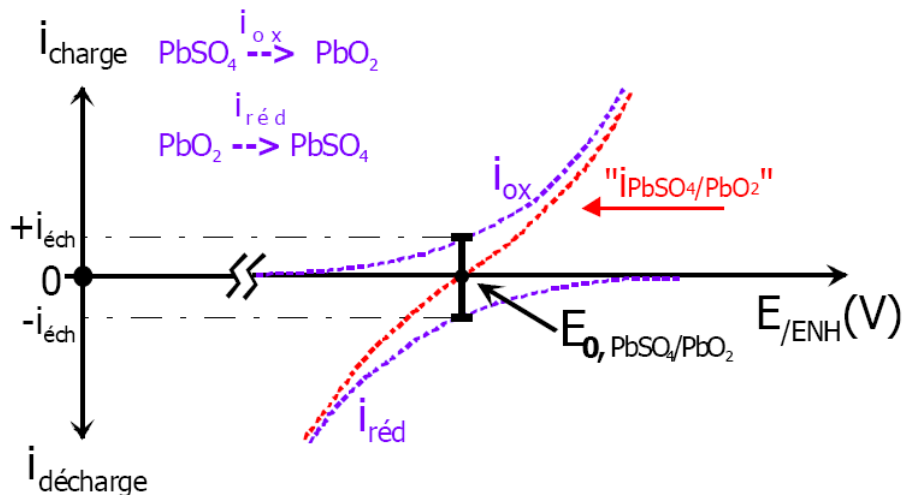


Figure 45 : Zoom au niveau de la tension d'équilibre [Dillensenger, 2004]

Lorsque nous nous écartons de la tension d'équilibre, un des courants devient prédominant sur le deuxième. L'équation générale de Butler-Volmer (eq. 34) permet de lier les courants d'oxydation i_{ox} et de réduction i_{red} au courant extérieur de la batterie et aux tensions. La loi de Tafel (eq. 35) néglige l'un des deux paramètres lorsqu'un fort courant circule dans un sens ou dans l'autre.

$$i_{PbSO_4/PbO_2}(\eta^+) = i_{ech,PbSO_4/PbO_2} \left\{ \exp \left[\frac{\alpha F}{RT} \eta^+ \right] \right\} \quad \text{eq. 34}$$

La loi de Tafel peut aussi être écrite de la façon suivante :

$$\ln \left(i_{PbSO_4/PbO_2}(\eta^+) \right) = a + b \eta^+ \quad \text{eq. 35}$$

La problématique est le recensement et l'identification de toutes les réactions chimiques se produisant dans la batterie. Dans cette partie, nous avons présenté succinctement les réactions principales se produisant dans la batterie. Dans la partie suivante, chacune des réactions chimiques est identifiée les unes par rapport aux autres en fonction de leur temps de réponse. La batterie est alors considérée comme une boîte noire et chaque réaction chimique est identifiée en fonction de son temps de réponse.

3.2.3 Modèles à constantes localisées

Pour notre application, le type de modèle à constantes localisées est le plus approprié. Dans ce paragraphe nous allons présenter uniquement le modèle, laissant les détails de l'identification de ses paramètres pour le paragraphe suivant, « 3.3 Modélisation de la batterie Enersys ».

Les modèles les plus simples sont des modèles basés sur le modèle de Thévenin. Ces modèles sont alors soit statiques (décharge à courant constant) [Mayer, 1989] , [Schiffer, 2007] soit dynamiques (prise en compte de la dynamique chimique de la batterie) [Ceraolo, 2000], [Zhan, 2003]. Dans la suite, nous présenterons uniquement des modèles à constantes localisées dynamiques. Un premier modèle très simple est le modèle de Thévenin généralisé :

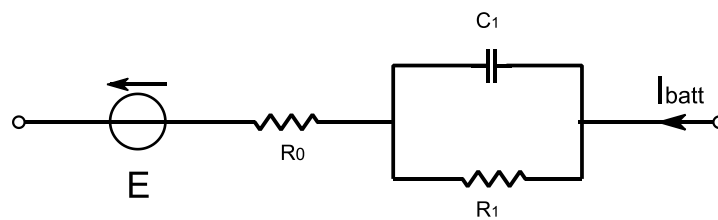


Figure 46 : Modèle de Thévenin généralisé

avec : E est la tension à vide de la batterie, $R_0 + R_1$ est la résistance interne de la batterie et la cellule $R_1 - C_1$ est la cellule de surtension de la batterie (représentation partielle des dynamiques chimiques).

Une modélisation plus fine des dynamiques chimiques est basée sur le modèle de Randles (Figure 47). Dans ce type de modélisation, il est possible d'associer un phénomène physique à un circuit électrique. Nous représentons par R_Ω la résistance ohmique de l'électrolyte et la connectique, R_{tc} la résistance de transfert de charge, C_{dl} la capacité de double couche des électrodes (double layer) et Z_W l'impédance de Warburg.

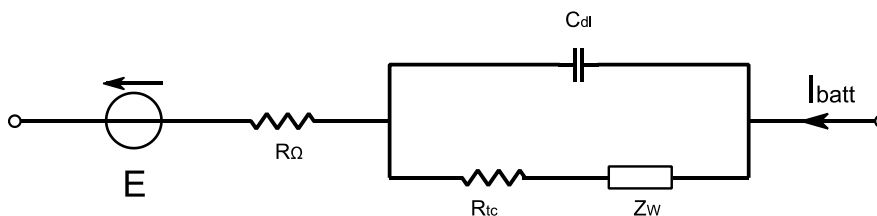


Figure 47 : Modèle de Randles

Si l'étude de la cellule R_{tc} Z_w C_{dl} montre clairement qu'il y a deux constantes de temps distinctes, la structure peut être simplifiée par le regroupement de la résistance de transfert de charge et de la capacité de double couche dans une seule impédance, en série avec l'impédance de Warburg (eq. 36). Cette dissociation provient physiquement de la différence entre la vitesse du transfert de charge et la vitesse de la diffusion.

$$Z(s) = R_{\Omega} + \frac{R_{tc}}{1 + R_{tc} C_{dl} s} + Z_w \quad \text{eq. 36}$$

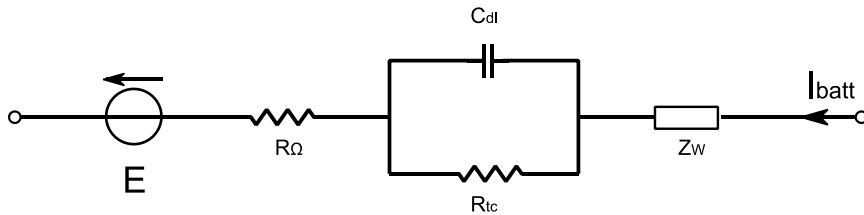


Figure 48 : Modèle de Randles simplifié

Pour notre batterie, nous identifions immédiatement la différence entre les deux fréquences caractéristiques : de 5mHz pour la cellule R_{tc} C_{dl} et de l'ordre du micro Hertz pour l'impédance de Warburg (Figure 49). Par conséquent, notre modèle général sera celui illustré sur la Figure 48.

Sur la Figure 49, la résistance R_{Ω} est représentée par la partie réelle avant la demi-ellipse de l'impédance de double couche (5mΩ dans notre cas). Les grandeurs du phénomène de double couche, R_{tc} et C_{dl} , sont identifiées grâce aux dimensions du demi cercle ; la valeur de C_{dl} est calculée à partir de la fréquence correspondant au sommet du demi cercle, correspondant à la partie imaginaire et la valeur de R_{tc} correspondant au diamètre du demi cercle. L'identification de l'impédance de Warburg est en fonction de la forme de la courbe et sera détaillée dans la suite.

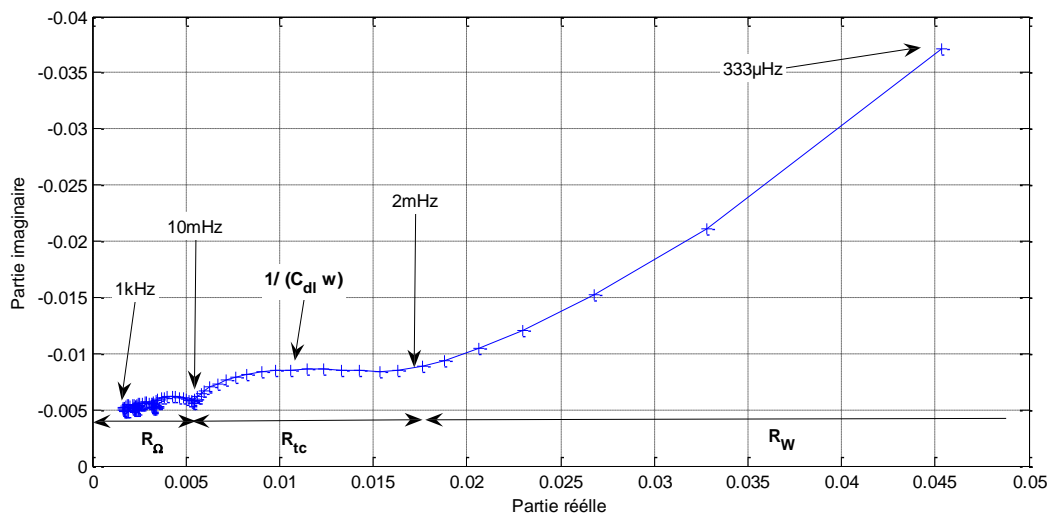


Figure 49: Diagramme de Nyquist de la batterie étudié Enersys à 80A @ 20°C

L'impédance de Warburg, qui permet de modéliser la diffusion, est une fonction de transfert à ordre non-entier (eq. 37). Il existe plusieurs formulations de l'impédance de Warburg, la différence entre les différents modèles proposés [Karden, 2001] repose sur la prise en compte des limites géométriques de la batterie (Figure 50). La première formulation repose sur le fait qu'il y a aucune limitation de la diffusion et le volume de la batterie est considéré infini (courbe a), la deuxième prend en compte l'effet de la diffusion dans un volume non limité (courbe b) et la dernière prend en compte l'effet de la diffusion dans un volume de la batterie limité (courbe c).

$$Z_w(s) = \frac{(1 + \tau_2)^{n_2}}{(\tau_1)^{n_1}} \quad \text{eq. 37}$$

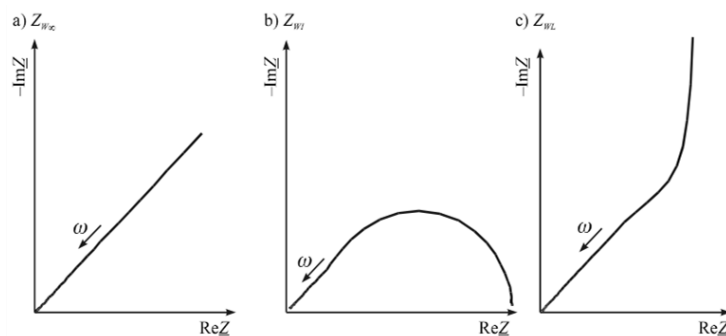


Figure 50 : Les 3 possibilités des impédance de Warburg, a) diffusion semi infinie, b) diffusion limitée avec un réservoir idéal aux limites, c) diffusion et réservoir limité [Karden, 2001]

Dans notre cas, l'impédance de Warburg a une forme de diffusion limitée avec un réservoir idéal aux limites (la forme b de la Figure 50 à comparer à la spectroscopie d'impédance mesurée sur la Figure 61). Nous pouvons modéliser cette tendance par la formulation mathématique suivante :

$$Z_w(s) = \frac{k_2}{\sqrt{s}} \tanh\left(\frac{k_1}{k_2} \sqrt{s}\right) \quad \text{eq. 38}$$

Nous allons reformuler cette équation pour une raison de programmation du modèle numérique sous Matlab/Simulink. Cette reformulation permettra d'exprimer l'impédance de Warburg sous forme d'un circuit électrique, d'une série finie de cellules RC.

Selon [Khun, 2006], la fonction tangente hyperbolique vérifie le théorème de Mittag-Leffer et peut donc être décomposé de la façon suivante :

$$\tanh(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{x - j\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)} \quad \text{eq. 39}$$

La série peut être simplifiée en utilisant les propriétés du conjugués des pôles complexes :

$$\tanh(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2x}{x^2 + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} \quad \text{eq. 40}$$

Nous obtenons alors :

$$Z_w(s) = \frac{k_2}{\sqrt{s}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \frac{k_1}{k_2} \sqrt{s}}{\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 s + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} \quad \text{eq. 41}$$

Cette équation peut être simplifiée :

$$Z_w(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{k_1}{2 k_2^2} s + \frac{1}{2 k_1} \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} \quad \text{eq. 42}$$

Nous avons choisi la série de Foster pour exprimer la série de résistances et d'admittances :

$$Z_w(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{Y_n + \frac{1}{Z_n}} \quad \text{eq. 43}$$

Les valeurs sont obtenues simplement par identification :

$$Z_n = \frac{2 k_1}{\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} ; \quad Y_n = \frac{k_1}{2 k_2^2} s \quad \text{eq. 44}$$

Par conséquent, l'impédance est modélisée par une résistance et l'admittance est modélisée par un condensateur :

$$Z_w(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{C_n s + \frac{1}{R_n}} \quad \text{eq. 45}$$

$$R_n = \frac{8 k_1}{(2n - 1)^2 \pi^2} ; \quad C_n = \frac{k_1}{2 k_2^2}$$

Il est à noter que C_n est constante quelque soit la cellule étudiée. De plus [Mauracher, 1997] montre que la somme des résistances R_n est égale à k_1 :

$$k_1 = \sum_{n=1}^{\infty} R_n \quad \text{eq. 46}$$

Pour aider dans la compréhension des phénomènes physiques, nous utiliserons cette nouvelle variable pour montrer clairement que la variable k_1 représente la partie réelle de l'impédance de Warburg :

$$R_{\text{Warburg}} = k_1 = \sum_{n=1}^{\infty} R_n \quad \text{eq. 47}$$

Dans notre modèle nous nous limiterons à 4 cellules pour la raison de la réduction du temps de calcul. Le résumé de notre modèle est décrit ci-dessous avec les différentes variables utilisées.

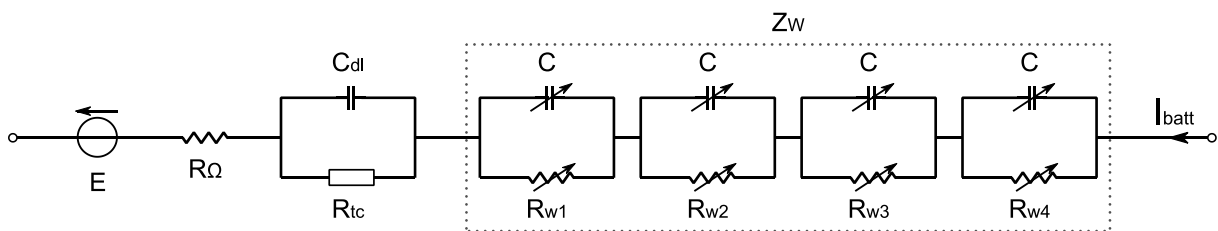


Figure 51 : Modèle de Randles détaillé

Avec :

$$Z_w(s) = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{C_n s + \frac{1}{R_n}}$$

$$R_n = \frac{8 k_1}{(2n - 1)^2 \pi^2} ; \quad C = \frac{k_1}{2 k_2^2} \quad \text{eq. 48}$$

$$R_{\text{Warburg}} = k_1 = \sum_{n=1}^4 R_n$$

Lors de l'identification, le paramètre k_1 représente la partie réelle de l'impédance Z_w . Ensuite le paramètre k_2 est déterminé par l'identification de la constante de temps $R_n C$ de la batterie pour un courant donné. Nous allons détailler dans la suite du document la méthode d'identification des paramètres de notre batterie.

3.3 Modélisation de la batterie Energys

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter brièvement les caractéristiques de la batterie modélisée et l'incertitude de la chaîne de mesure lors des différents essais qui ont permis d'identifier les paramètres de la batterie. Ensuite nous allons présenter le modèle de la batterie Energys et la procédure préalable nécessaire à la vérification de l'état de la batterie.

3.3.1 Caractéristiques constructeur

Cette batterie est fabriquée pour le démarrage des véhicules militaires lourds. Dans le cadre du projet ARCHYBALD, le choix de la batterie a été limité à cette gamme de batteries. Lors du dimensionnement du pack batterie, nous avons choisi la batterie au plomb de 12V qui a une capacité de 80Ah à un courant de décharge de C_1 . Ce type de batterie militaire est fabriqué à partir de plomb quasiment pure (99% Pb), ce qui permet d'obtenir de meilleures performances que pour une batterie au plomb classique.

Dans les autres véhicules lourds de type benne à ordures ménagères, les batteries rencontrées sont souvent des batteries au plomb et quelques fois NiMH et Li-ion [Courbevoie, 2011]. Ce choix de technologie vient du fait que le coût des autres technologies de batteries est encore trop cher et pour certaines, non sûre pour cette gamme de température d'utilisation (température maximale de la batterie li-ion : 60°C).

Toutes les données du constructeur Energys [Armasafe, 2012] sont données dans le tableau ci-dessous et dans l'annexe 8.

Grandeur Electrique	Valeur	Unité en S.I.
Date de fabrication	09/2009	-
Standard de conception	BAT264	-
Tension Max/Nominal/Min(V)	14,28 / 12 / 10,5	V
Capacité selon le standard de référence (Ah)	$C_1 = 80$; $C_{10} = 110$; $C_{20} = 120$	Ah
Résistance interne	2	m Ω
Courant de décharge selon le standard de référence (A)	5.5	A
CCA (SAE) (A)	1225	A
Capacité de réserve (Minutes)	240	min
Maximum Mass (kg)	40	kg
Longueur (mm)	286	mm
Largeur (mm)	269	mm
Hauteur (mm)	230	mm
Plastic du bac et couvercle	FR polypropylene	-
Bornes	BS 3911	-
Compensation en tension	-2.57	mV/°C
Gain en Energie / Température	+1	Ah/°C

Tableau 15 : Données du constructeur Energys

3.3.2 Les erreurs de mesure

Avant toute mesure, nous devons étudier l'incertitude des mesures provoquées par les chaînes de mesure.

Nous pouvons distinguer deux types d'erreur de mesure, une erreur systématique et une erreur aléatoire. L'erreur systématique peut être soit corrigée à l'aide d'un étalon (une référence) ou ignorée. L'erreur aléatoire ne peut pas par définition être corrigée car elle provient des erreurs de lecture de l'appareil, de l'influence de la température, des perturbations extérieures, etc... Cette erreur peut être minimisée par la multiplication du nombre de mesures/expériences.

Mesure de la tension de la batterie

La mesure de la tension de la batterie est une mesure directe de la différence de potentiel entre les bornes de la batterie. L'enregistreur Graphtec WR310 mesure cette tension à l'aide de 2 fils torsadés d'une longueur de 1m50. Cette incertitude est proportionnelle à la valeur du calibre de l'appareil de mesure du Graphtec. Pour la mesure de tension d'une batterie de 12V, le calibre ainsi choisi est 20V, ce qui entraîne une incertitude de mesure de $\pm 54,9\text{mV}$ soit $\pm 0,458\%$ en erreur relative. L'annexe 2 recense le calibre utilisé pour les enregistrements réalisés avec le Graphtec.

<u>Calibre</u>	<u>Erreur de mesure</u>
20V	$\pm 54,9\text{mV}$

Mesure de courants faibles circulant dans la batterie ($I < 10\text{A}$)

Pour augmenter la précision des mesures des courants de faible amplitude, nous utilisons un capteur de courant à effet hall très précis qui permet de copier l'image du courant avec une isolation galvanique entre le courant réel et le signal de sortie. La mesure du courant se fait à l'aide d'un capteur LEM Ultrastab 868-20I. Ce capteur génère un signal de sortie compris entre $\pm 50\text{mA}$ pour un courant en entrée de $\pm 12,5\text{A}$ (atténuation_{LEM} = $50\text{e-}3/12,5$).

Le courant de sortie du LEM est enregistré par le Graphtec qui mesure la tension aux bornes d'une résistance de 10Ω d'une précision de 0,1%.

Dans la suite de la chaîne de mesure, la mesure du courant est encore détériorée par la numérisation du signal. La valeur de l'incertitude est de l'ordre de 40mA sur l'intervalle de mesure comprise entre 10A et 500mA. L'erreur relative est alors comprise entre 0,40% pour 10A et jusqu'à 7% pour un courant de 500mA.

I_{MESURE}	Calibre Graphtec	Erreur de mesure
500mA	500mV	$\pm 34,6\text{mA} (\pm 6,9\%)$
10A	500mV	$\pm 40,4\text{mA} (\pm 0,40\%)$

Mesure de courant fort circulant dans la batterie ($I > 30A$)

Nous utilisons un shunt de courant de $1m\Omega$ pour la mesure des courants de plus forte amplitude. L'incertitude de mesure est alors comprise entre 200mA pour un courant de 30A et jusqu'à 2A pour un courant de 400A. L'incertitude relative est toujours proche de 0,50% pour toutes les amplitudes des courants mesurés.

Consigne du courant	Calibre Graphtec	Erreur de mesure
30A	50mV	$\pm 197mA (\pm 0,66\%)$
80A	100mV	$\pm 434mA (\pm 0,54\%)$
150A	200mV	$\pm 849mA (\pm 0,56\%)$
200A	200mV	$\pm 949mA (\pm 0,47\%)$
400A	500mV	$\pm 2,17A (\pm 0,54\%)$

Les calculs de l'incertitude de mesure sur les résistances, impédances calculées sont détaillés dans l'annexe 2. Dans ce paragraphe, nous avons montré uniquement les incertitudes liées aux capteurs.

3.3.3 Vérification des batteries

Pendant le stockage des batteries, qui a duré 9 mois, nous avons enregistré l'évolution de la tension des batteries pour estimer l'autodécharge des batteries, ainsi que la température. Les batteries ont été entreposées dans le laboratoire, à la température ambiante. Sur la figure suivante nous montrons la disposition des batteries et des capteurs de température :

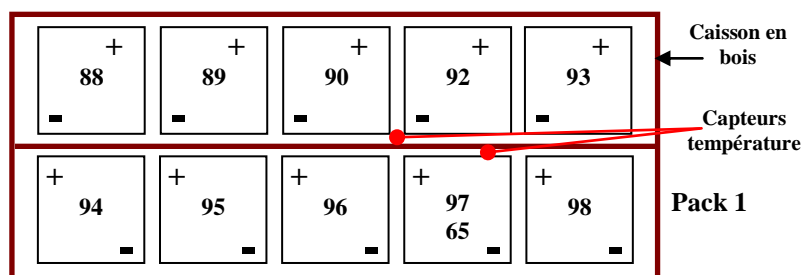


Figure 52 : Pack de batterie (Pack 1)



Figure 53 : Photo de l'épérience de la mesure de l'autodécharge

L'autodécharge des batteries est illustrée Figure 54 :

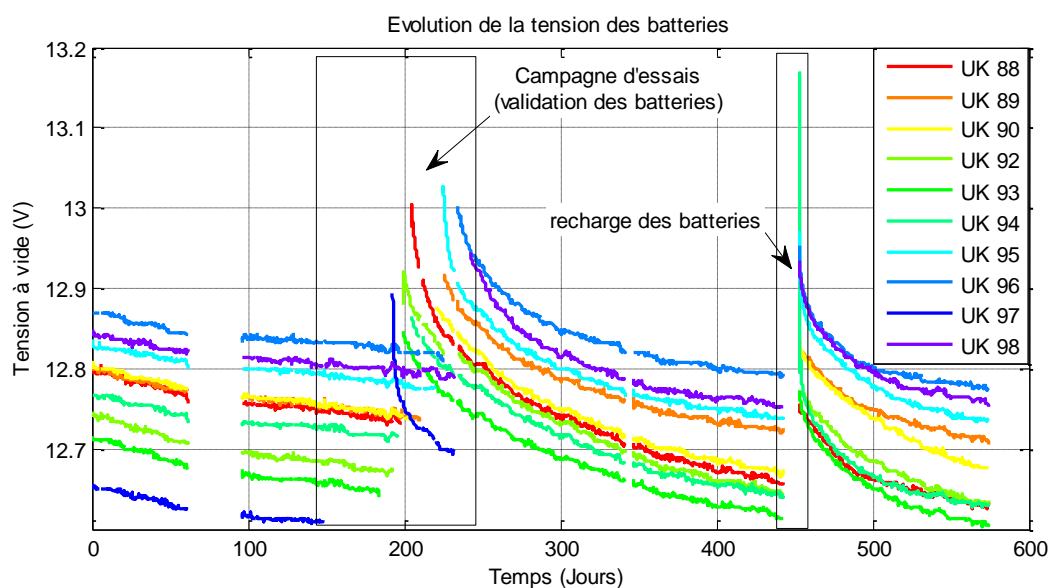


Figure 54 : autodécharge des batteries pendant 1 an et demi

200 jours après le début de l'enregistrement de l'autodécharge nous avons démarré une campagne de caractérisation des batteries. Au 450ème jour, les batteries ont été toutes rechargées car il faut éviter que la tension aux bornes de la batterie soit trop faible.

La faible chute de tension lors des 200 premiers jours nous a montré un faible taux d'autodécharge, car il a eu très peu de chute de tension. Il est très vite apparu que la première cause de la variation de la tension vient de la stabilisation chimique de la batterie (homogénéisation de l'électrolyte) et la deuxième est surtout due à la variation de la température dans la salle de stockage (température de stockage variant de 10°C à 25°C) :

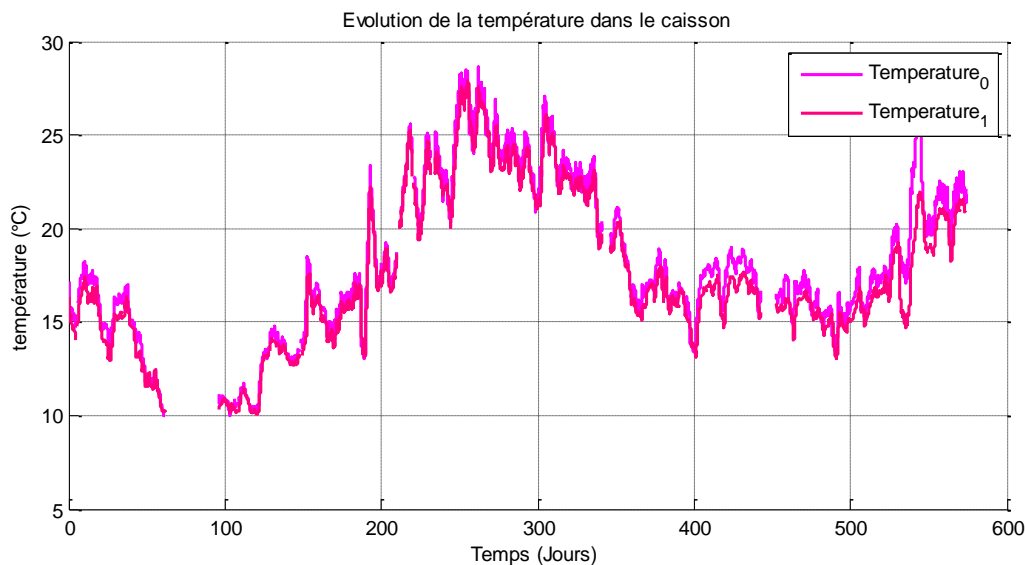


Figure 55 : Evolution de la température lors de l'autodécharge

La mesure de l'autodécharge aurait dû être faite de la façon suivante : une recharge complète, suivie d'un long temps de stockage à une température la plus stable possible et dans un dernier temps, la mesure directe de l'énergie restante dans la batterie par une décharge complète. Les conditions dans le laboratoire n'étant pas propice à ce genre d'expérimentation, nous avons procédé à d'autres tests.

Néanmoins, la batterie UK97 a montré des signes de faiblesse au niveau de sa capacité nominale. Il est à noter que la tension à vide de la batterie était toujours la plus faible du pack et ceci malgré les recharges.

Nous avons vérifié, après 200 jours de stockage, les 20 batteries à l'aide d'un protocole d'essais. Ce protocole d'essais est composé de trois tests qui permettent de mesurer : la capacité à C/10, l'impédance interne et la résistance interne de la batterie chargée. Ces tests sommaires ont eu pour rôle de faire le point sur l'état de santé des batteries en début d'essais.

Afin de vérifier les batteries, nous avons mis au point une procédure de **mesure individuelle de la capacité des batteries**. La procédure est illustrée sur la Figure 56. Elle est composée des deux cycles de charge-décharge. Chaque cycle est de type CCCV (charge ou décharge à courant constant suivi de décharge ou charge à tension constante). La raison pour laquelle nous avons opté pour deux cycles est le fait que les batteries étaient neuves, sans « rodage ». Nous avons observé sur deux batteries qu'il suffit de deux cycles de charge/décharge pour obtenir une valeur stable de la capacité de la batterie – voir l'exemple des batteries UK92 et UK93 dans le Tableau 16 : la valeur de la capacité se stabilise à 111Ah dès le deuxième cycle :

Capacité [Ah]	Cycle #1	Cycle #2	Cycle #3	Cycle #4	Cycle #5
UK92	103	111	110		
UK93	103	111	111	111	111
UK97	45	47	48	50	51
UK98	124	130			
UK06	94.5	106			

Tableau 16: Extrait des capacités initiales des batteries à C/10

Nous avons choisi de tester la capacité à C/10 pour deux raisons principales. La première raison est d'ordre pratique, nous avons utilisé un spectromètre d'impédance comme alimentation/charge, spectromètre qui était limité à 10A (valeur la plus proche de 11A que représente C_{10} de la batterie). Une autre raison est liée à l'utilisation journalière de la batterie : initialement nous avons prévu une utilisation de 10heures de la benne à ordures (le dimensionnement final est pour 8heures de travail par jour).

Le protocole d'essais a été le suivant :

- ✓ Le cycle de rodage : une *charge CCCV* de la batterie ($I_{Batt_Max} = 10A$ tant que la tension de la batterie est inférieure à 14.28V, suivi d'une recharge à tension constante $U_{Batt_Max} = 14,28V$ tant que le courant est supérieur à 500mA) suivi une *décharge CCCV* complète ($I_{Batt_min} = -10A$ tant que la tension de la batterie est supérieure à 10.5V, suivi d'une décharge à tension constante $U_{Batt_min} = 10,5V$ tant que le courant est inférieur à -500mA) et d'une *charge CCCV* complète ($I_{Batt_Max} = 10A$ tant que la tension de la batterie est inférieure à 14.28V, suivi d'une recharge à tension constante $U_{Batt_Max} = 14,28V$ tant que le courant est supérieur à 500mA).
- ✓ Suivi d'un cycle complet qui permet de **mesurer la capacité nominale C_{10}** : une *décharge CCCV* complète ($I_{Batt_min} = -10A$ tant que la tension de la batterie est supérieure à 10.5V, suivi d'une décharge à tension constante $U_{Batt_min} = 10,5V$ tant que le courant est inférieur à -500mA) et d'une *recharge CCCV* complète ($I_{Batt_Max} = 10A$ tant que la tension de la batterie est inférieure à 14.28V, suivi d'une recharge à tension constante $U_{Batt_Max} = 14,28V$ tant que le courant est supérieur à 500mA).

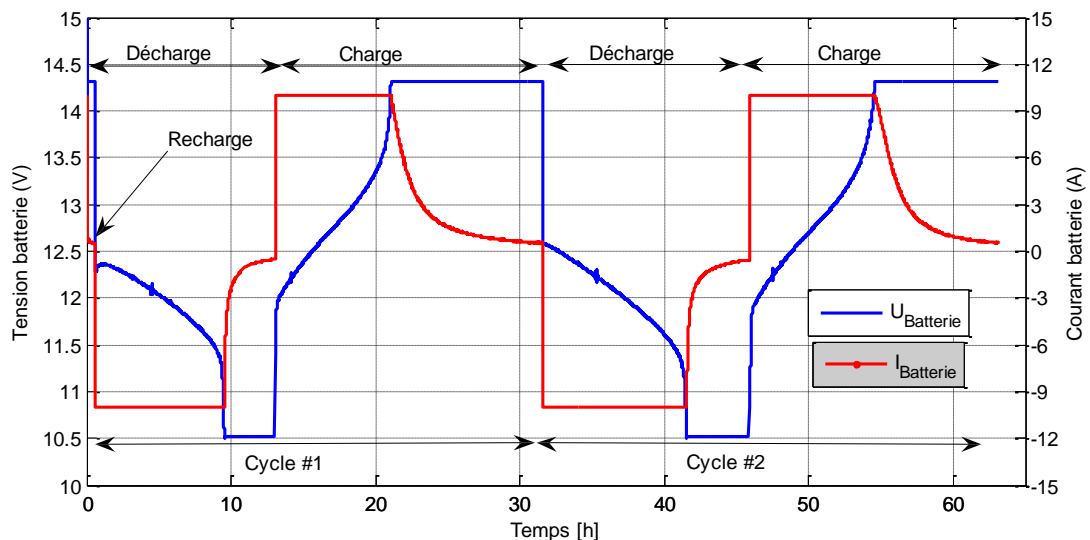


Figure 56 : Exemple de 2 cycles de rodage de la batterie UK96

Les résultats obtenus sont illustrés dans le Tableau 17. La capacité de la batterie UK97 a été mesurée à la réception bien en dessous des spécifications du constructeur (45Ah au lieu de 110Ah). Une procédure de désulfatage de la batterie a été testée afin de récupérer une partie de la capacité nominale de la batterie UK97. Les résultats sont présentés en annexe 1.

Les autres batteries ont une capacité moyenne de 108Ah avec une variation de -2Ah à +24Ah. Pour une étude énergétique, il est utile de mesurer l'énergie récupérée lors de la décharge, celle-ci est de l'ordre de 4,9MJ avec une variation comprise entre -340kJ à +740kJ.

Batteries	Capacité [Ah]		Batteries	Energie [MJ]	
	Cycle #1	Cycle #2		Cycle #1	Cycle #2
UK65	131	132	UK65	5,59	5,64
UK87	99	106	UK87	4,20	4,54
UK88	122	127	UK88	5,18	5,40
UK89	121	127	UK89	5,17	5,43
UK90	118	124	UK90	4,97	5,28
UK91	111	115	UK91	4,73	4,96
UK92	103	111	UK92	4,41	4,77
UK93	103	111	UK93	4,37	4,77
UK94	100	90*	UK94	4,27	3,86
UK95	106	113	UK95	4,55	4,90
UK96	124	129	UK96	5,27	5,56
UK97	45	47	UK97	1,98	2,06
UK98	124	130	UK98	5,29	5,58
UK99	104	110	UK99	4,45	4,75
UK00	107	117	UK00	4,56	4,98
UK01	103	109	UK01	4,38	4,65
UK02	99	109	UK02	4,25	4,70
UK03	93	106	UK03	3,98	4,56
UK04	102	116	UK04	4,35	4,98
UK05	95	110	UK05	4,05	4,72
UK06	94.5	106	UK06	4,05	4,57
Moyenne	108	115	Moyenne	4,6	4,9

Tableau 17 : Comparatif des capacités et des énergies récupérées dans chaque batterie des 2 packs

* La valeur est due au non respect de la procédure (condition d'arrêt de la charge/décharge différente de 500mA)

Pour certaines batteries, la dernière recharge de la batterie a été réalisée à l'aide d'une autre alimentation stabilisée qui permet de fournir un courant de charge jusqu'à 300A à une tension constante (Figure 57). Dès le début de la recharge, la tension aux bornes de la batterie est réglée à 14,28V et le courant n'est limité que par la vitesse des réactions chimiques de la batterie. Il s'agit d'ailleurs de la méthode de recharge conseillée par le constructeur. Le courant initial de la batterie est alors d'environ 150A avec un maximum de 210A en 10min de charge et qui ensuite décroît à 500mA en 8 heures de charge rapide. Le point faible de cette recharge rapide est l'augmentation significative de la température de la batterie. La température du boîtier de la batterie évolue de 21°C jusqu'à atteindre un maximum de 38°C en 2 heures de temps. Le boîtier retrouve sa température d'origine 20 heures après ce maximum soit 12 heures après la fin de charge.

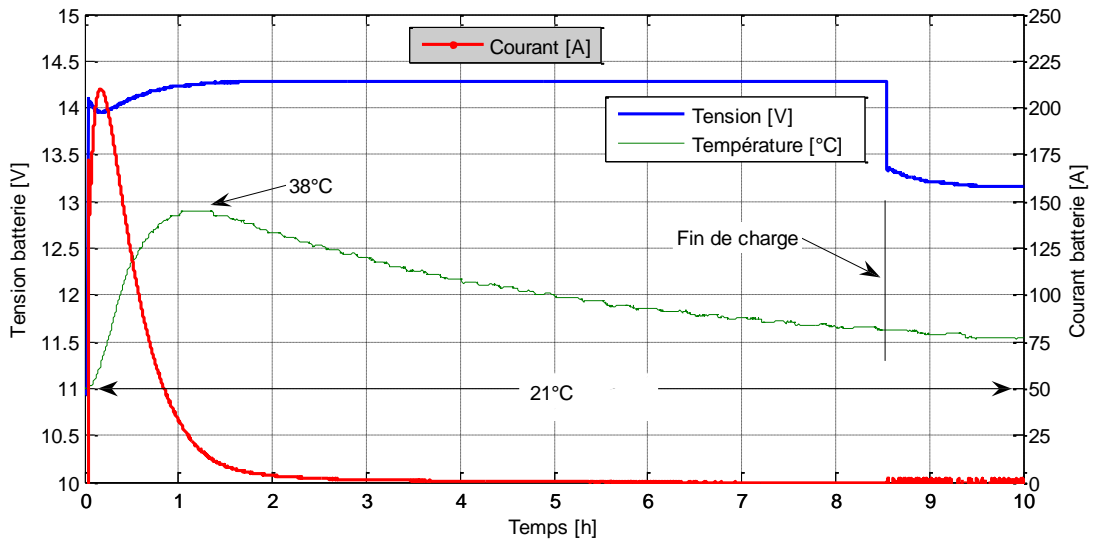


Figure 57 : Recharge complète de la Batterie UK89

La vitesse de recharge est nettement plus rapide avec la méthode de charge rapide que pour la méthode avec limitation du courant de charge. La charge rapide est réalisée en 3h alors qu'il faut plus de 18h pour le deuxième type de recharge (CCCV). La quantité de charges fournies par les deux méthodes de recharge est affichée sur la Figure 58. Evidemment, la condition d'arrêt de la charge est la même dans les deux cas (500mA) et l'état de charge initial est quasiment la même (elle est estimée à partir de la tension à vide après un temps de repos suffisant). Par la méthode CCCV et pour le courant de 10A, nous observons que nous pouvons charger à courant constant (10A) une batterie jusqu'à environ 80% d'état de charge. Ensuite, la charge à tension constante est indispensable pour stocker les derniers 20-30Ah.

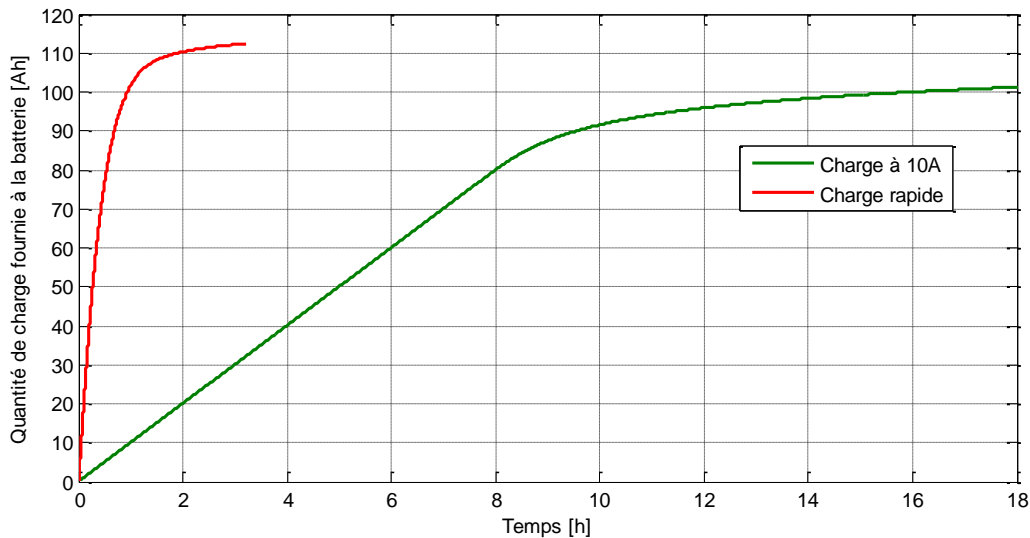


Figure 58 : Comparatif de deux méthodes de recharge

Une autre information qui peut être extraite de ces essais, c'est le rendement faradique. Il est proche de 99% lorsque le rapport en [Ah] est réalisé entre la phase de décharge et de charge de la batterie. Le rendement énergétique, qui représente le rapport entre l'énergie qui est récupérée à

bord du véhicule divisé par l'énergie qui est fournie aux batteries lors de la recharge, est de l'ordre de 90% pour les batteries testées.

La deuxième phase d'essais consiste à **mesurer l'impédance interne** des batteries. La mesure de l'impédance a été réalisée à l'aide d'une spectroscopie d'impédance avec un courant alternatif d'amplitude 500mA maximum afin de ne pas modifier l'état de charge en basse fréquence ($\Delta C = 0,45Ah$ sur les 110Ah à 100 μ Hz). Les fréquences minimales et maximales des spectroscopies sont listées dans le Tableau 18. Sur la Figure 61 et la Figure 62, les spectres des différentes batteries sont affichés. On constate une forte dispersion de $\pm 30\%$ de l'impédance en basses fréquences (Figure 61) et aussi en hautes fréquences (Figure 62).

Campagne EIS	Fréquences		F < 66Hz		F > 66Hz		Durée
	min	max	Step / Décade	Périodes	Step / Décade	Périodes	
UK93, UK96, UK97, UK04 UK05	100 μ Hz	5kHz	5	1	5	10	~ 20h
UK92	1mHz	5kHz	10	5	20	10	~30h
UK03, UK06	1mHz	5kHz	4	4	5	5	~2h
UK87, UK88, UK89, UK90, UK95, UK99, UK00,UK01, UK02, UK91, UK67	1mHz	5kHz	5	4	20	10	~ 4h
UK94	1mHz	5kHz	10	4	20	10	~ 8h
UK98	100 μ Hz	10kHz	10	10	20	20	~ 56h

Tableau 18 : Fréquences caractéristiques des spectroscopies d'impédance

Dans le Tableau 18, nous montrons les configurations testées. La plage minimale que nous nous sommes imposée était de 1mHz à 5kHz, mais en fonction de la disponibilité de l'appareillage, nous avons aussi testé des fréquences plus basses (100 μ Hz) pour avoir une idée des limites. Nous avons choisi un temps de 4 heures de mesure afin d'obtenir un bon compromis entre la précision des mesures et le temps de l'essai. Nous avons aussi profiter du temps des week-ends pour réaliser des essais de très longue durée, de 20 heures jusqu'à 56 heures, afin d'augmenter la précision des mesures et la plage des fréquences mesurées.

Les résultats nous ont montré que le phénomène de double couche est négligeable par rapport à la diffusion, pour différents courants de 500mA et jusqu'à 200A.

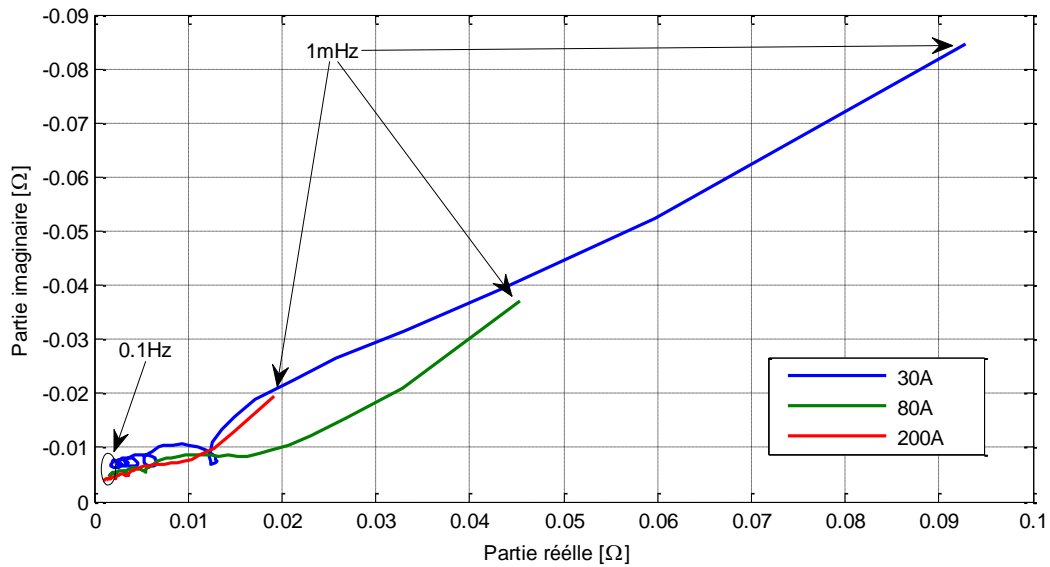


Figure 59 : Diagramme de Nyquist pour différentes valeurs de courant

Les spectres d'impédance obtenus pour des courants plus élevés que 500mA ont été obtenus par la méthode chronoampérométrie (analyse spectrale de la tension pour un créneau de courant d'une certaine amplitude), décrite dans [Do, 2010]. Trois exemples de spectre obtenus par cette méthode sont illustrés sur la Figure 59, pour la UK 06, SoC initial de 80% .

Ces spectres, pour des courants faibles ou importants sont très différents. L'état de charge influe également l'impédance interne, comme nous pouvons la constater également sur la Figure 60 :

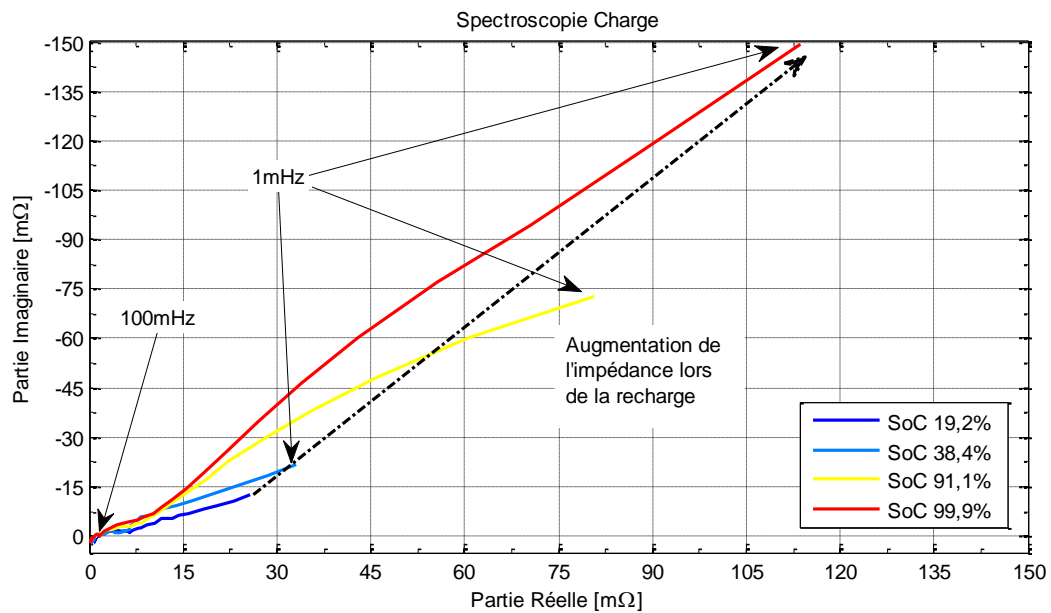


Figure 60 : Evolution de l'impédance de la batterie UK06 en fonction du SoC

Les quatre courbes ont été obtenues par spectroscopie d'impédance, à 500mA et température contrôlée. L'allure des courbes en basse fréquence semble s'incurver vers l'axe des réels, formant ainsi un grand demi-cercle. En haute fréquence, les effets du transfert de charge et de la résistance ohmique deviennent prédominants. Il est à noter la présence d'une très faible inductance parasite en très haute fréquence.

La spectroscopie d'impédance nous a permis de constater également la grande dispersion des paramètres parmi les 20 batteries, pourtant de la même série (Figure 61 & Figure 62).

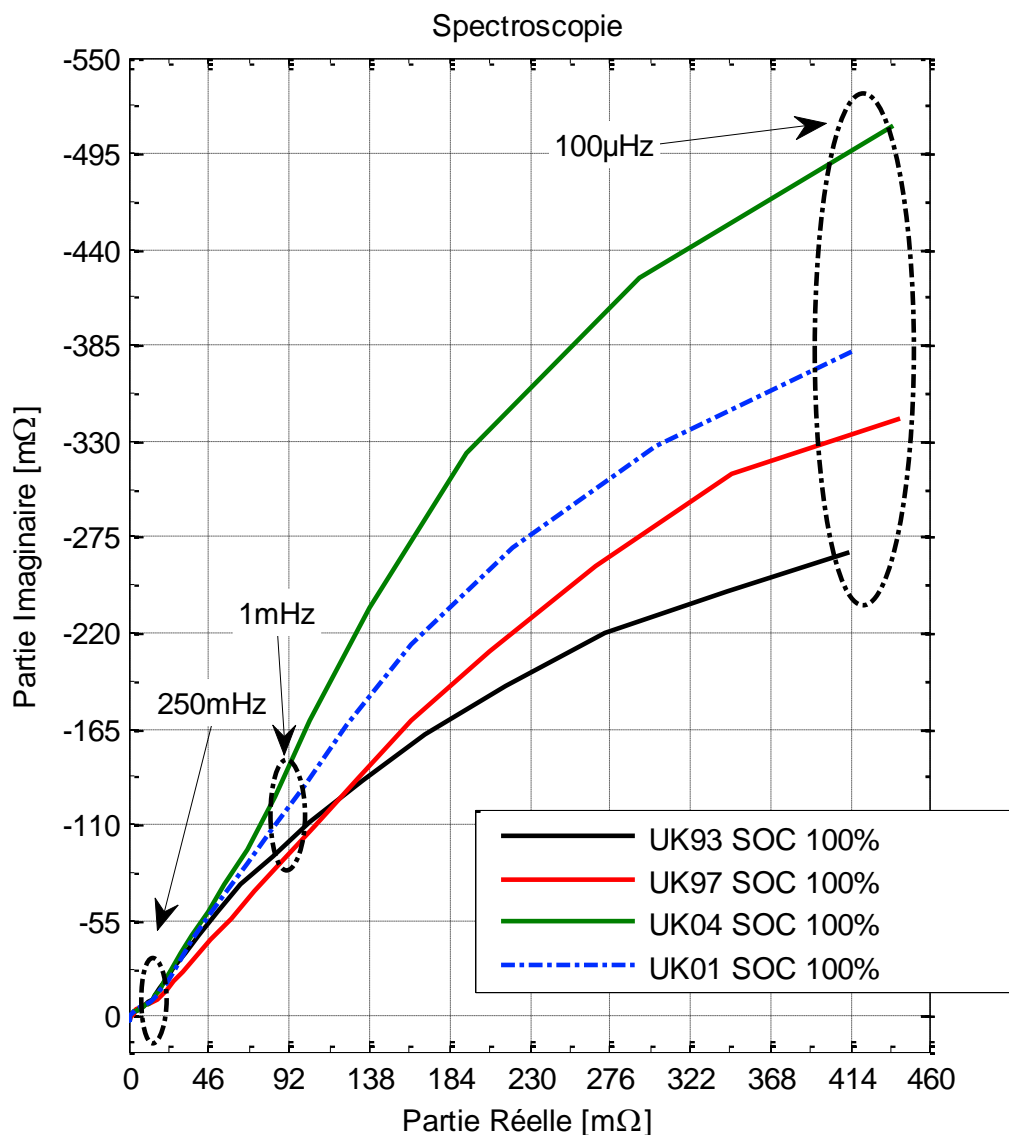


Figure 61: 4 spectroscopies d'impédance de 4 batteries [10kHz > f > 100μHz] à 500mA à température ambiante

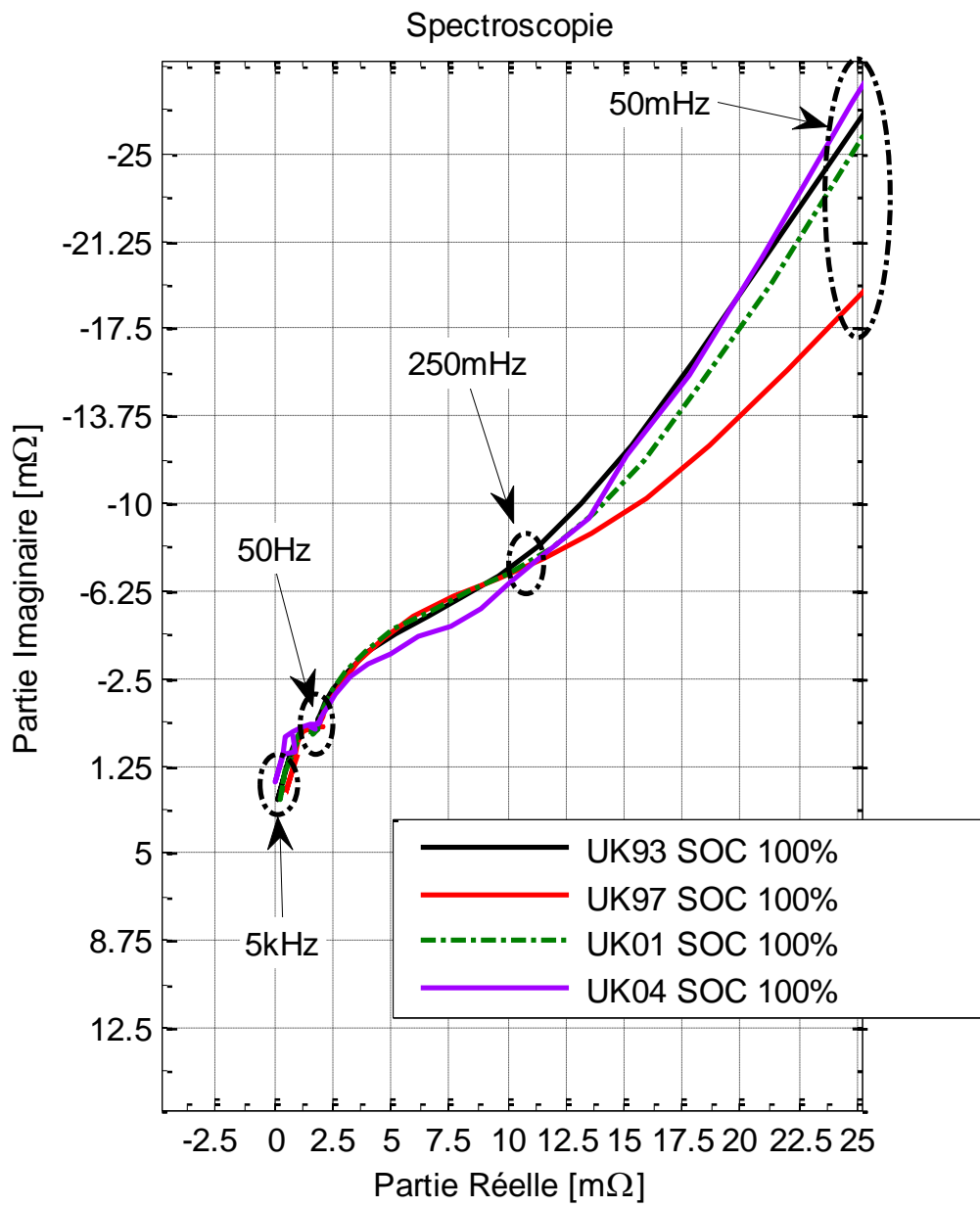


Figure 62 : Zoom sur les hautes fréquences [10kHz > f > 50mHz]

La **mesure de la résistance ohmique** consiste à mesurer la chute de tension instantanée provoquée par le passage d'un courant important en décharge (30A, 50A, 80A, 150A, 200A et 400A). Nous avons réalisé cet essai dans le but de vérifier la valeur de la résistance série de 2mΩ donnée par le constructeur. Cette mesure de chute de tension est la différence de tension moyennée sur 1μs avant et après l'arrêt du courant circulant dans la batterie (Figure 63).

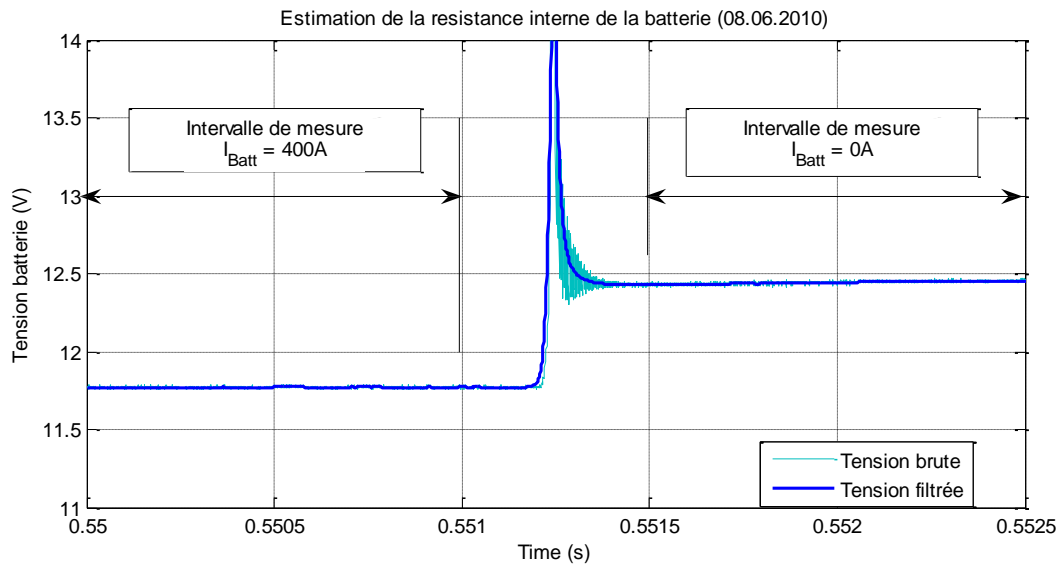


Figure 63 : Intervalles de mesure sur la commutation OFF du MOSFET

Les résistances internes des batteries sont répertoriées dans le tableau suivant. Il est à noter que la différence entre les valeurs des résistances internes est faible. De plus toutes les valeurs des résistances ohmiques sont inférieures à la valeur de 2mΩ donnée par le constructeur. La batterie sulfatée UK97 a une résistance interne valide malgré le fait qu'elle ne puisse fournir que 50% de la capacité nominale.

Batteries	UK65	UK87	UK88	UK89	UK90	UK91	UK92	UK93	UK94	UK95	UK96
Résistance [mΩ]	1,78	1,74	1,76	1,75	1,77	1,75	1,69	1,70	1,76	1,75	1,74
Batteries	UK97	UK98	UK99	UK00	UK01	UK02	UK03	UK04	UK05	UK06	
Résistance [mΩ]	1,77	1,74	1,76	1,81	1,77	1,82	1,74	1,82	1,74	1,74	

Tableau 19 : Résistances internes des 21 batteries

Les batteries ont toutes été vérifiées. Nous avons sélectionné la batterie UK06 pour la modélisation fine, car elle présentait des caractéristiques dans la moyenne des 20 autres batteries. Pour la suite du cyclage et de l'identification nous avons automatiquement exclu la batterie UK97 qui présentait des signes de sulfatage dès le premier cycle de rodage.

3.3.4 Méthodologie d'identification des paramètres du modèle

Le modèle que nous avons choisi est un modèle de Randles modifié. Ce modèle permet de simuler les dynamiques électriques des batteries au plomb avec précision. Nous y retrouvons « E » la tension à vide de la batterie (Open Circuit Voltage), « R_{Pol} » la résistance de polarisation qui inclut la résistance ohmique et la résistance de transfert de charge⁷ et « Z_W » une impédance complexe simulant les effets de la diffusion chimique. Ces paramètres dépendent à la fois du courant et de l'état de charge de la batterie de manière non-linéaire. Nous avons fait le choix de fusionner la résistance ohmique et la résistance de transfert de charge en une seule résistance nommée dans la suite du document : résistance de polarisation R_{Pol} .

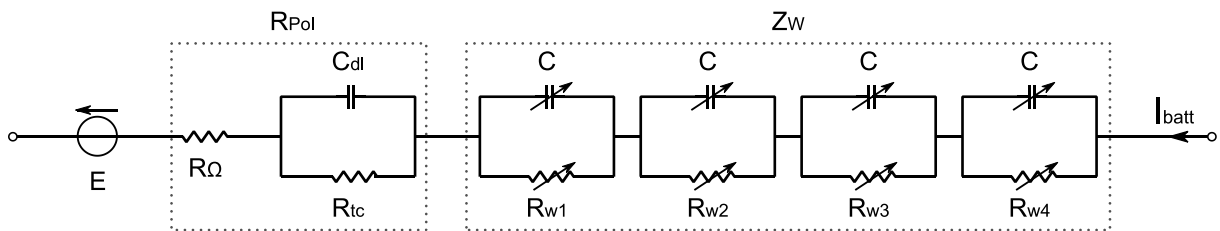


Figure 64 : Modèle complet de la batterie au plomb

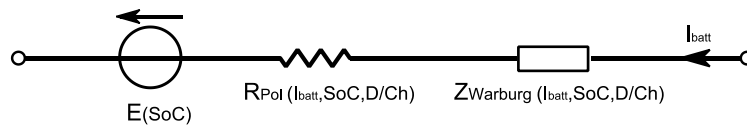


Figure 65 : Modèle de la batterie au plomb

Le modèle ainsi intégré dans le modèle numérique du véhicule est le suivant :

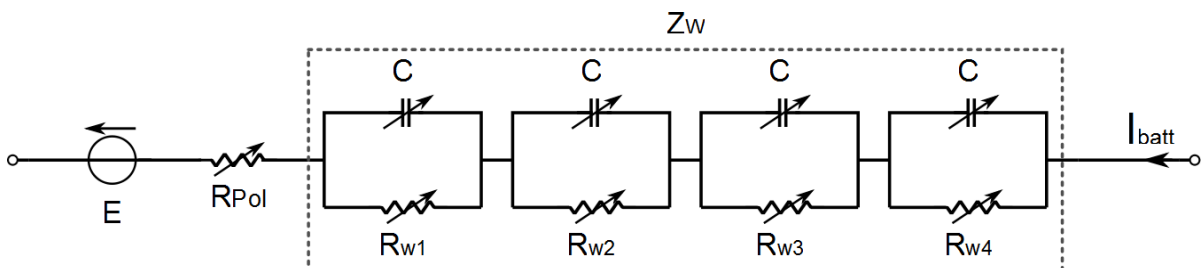


Figure 66 : Modèle de la batterie au plomb détaillé

Une inductance parasite est présente sur les spectres d'impédance en haute fréquence. Après identification, il est apparu qu'elle est négligeable par rapport aux autres éléments du modèle car sa valeur est d'environ à 100nH dans cette plage de fréquence. Nous négligerons son effet dans le modèle par rapport aux autres effets.

⁷ Les spectres d'impédance (Figure 61) nous ont permis de constater que le phénomène de double couche est négligeable, pour notre batterie, devant celui de diffusion. Ce constat permet l'intégration de la résistance de transfert de charge du modèle dans la résistance de polarisation et également permet de négliger la capacité de double-couche.

3.3.4.1 La tension à vide de la batterie

Dans un premier temps, nous identifions la tension à vide de la batterie en fonction de l'état de charge de la batterie UK06. L'essai est illustré sur la Figure 67 et la procédure décrite dans la suite:

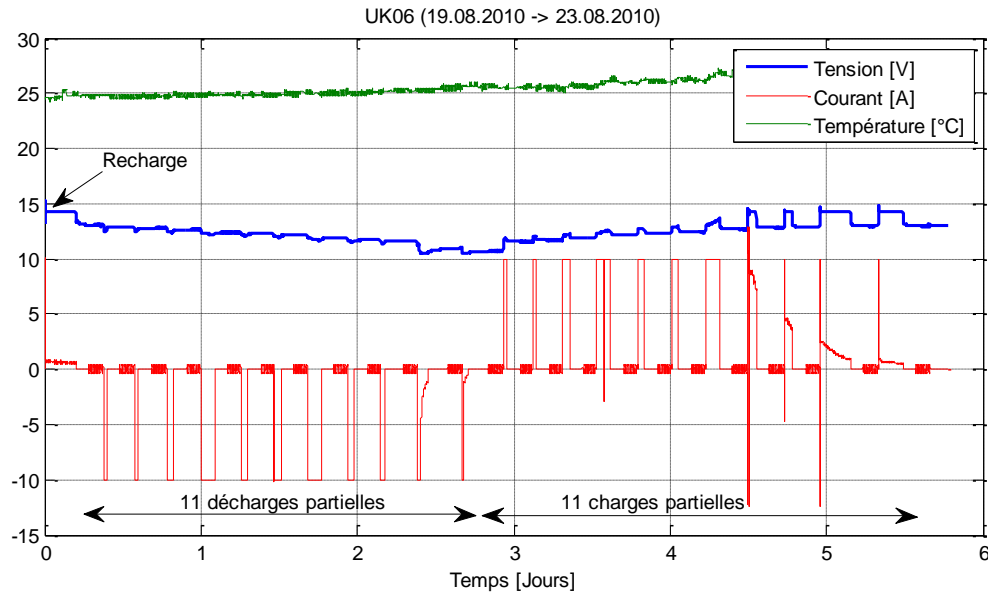


Figure 67 : Les pulses de décharges / charges avec des périodes de repos

- La batterie chargée à 100% (par la même procédure de charge CCCV décrite précédemment, Figure 56) est placée dans la chambre climatique et laissée pendant une journée au repos à 25°C - température contrôlée par l'enceinte climatique tout au long de l'essai,
- 9 décharges à courant constant (-10A) sont appliquées afin de décharger la batterie et atteindre 95%, 90%, 80%, 60%, 50%, 40%, 20%, 10%, 5% d'état de charge ; entre les décharges nous observons un temps de repos de 2heures.
- Deux dernières décharges à tension constante (10.5V) sont appliquées, afin d'extraire les derniers Ah. Elles sont également espacées dans le temps de 2heures. La première décharge extrait 5Ah et la dernière est arrêtée quand le courant atteint 500mA.
- La procédure est répétée, mais dans le sens de la charge afin de vérifier la présence d'une éventuelle hystérésis.

Pour information, les valeurs de la tension à vide de la batterie après deux heures de repos sont récapitulées dans les deux tableaux suivants :

SoC [%]	100	95,1	90,3	80,6	61,2	51,5	41,8	22,5	12,8	7,92	1,12	0
Tension à vide [V]	13,07	12,86	12,79	12,65	12,40	12,27	12,13	11,86	11,69	11,60	10,93	10,69
SoC [%]	4,79	9,60	19,2	38,4	47,9	57,5	76,79	86,3	91,1	97,8	99,9	100
Tension à vide [V]	11,56	11,68	11,86	12,17	12,29	12,42	12,72	12,85	12,90	13,00	13,02	12,98

Figure 68 : Tension à vide en fonction de l'état de charge (dans le sens de la décharge et la charge)

Cette procédure implique un compromis, car, pour avoir la meilleure précision de l'OCV, il faut laisser la batterie au repos le plus longtemps possible, allant jusqu'à 24h pour ce type de batterie, pour un seul état de charge ! Ce temps doit être optimisé pour à la fois minimiser le temps d'essais et garantir une bonne précision sur la mesure de la tension à vide de la batterie. Sachant que lors de l'arrêt du courant, la tension aux bornes se stabilise (~95% de la valeur finale) dans la première heure de repos de la batterie, il a alors été choisi de mesurer la tension aux bornes de la batterie au bout de deux heures de repos. Ce temps de repos de deux heures implique alors un temps d'essais total d'une semaine complète pour les 11 états de charge choisis (100%, 95%, 90%, 80%, 60%, 50%, 40%, 20%, 10%, 5%, 0%).

Nous constatons un très faible hystérésis de tension entre la charge et la décharge, inférieure à $\pm 50\text{mV}$, raison pour laquelle nous allons le négliger.

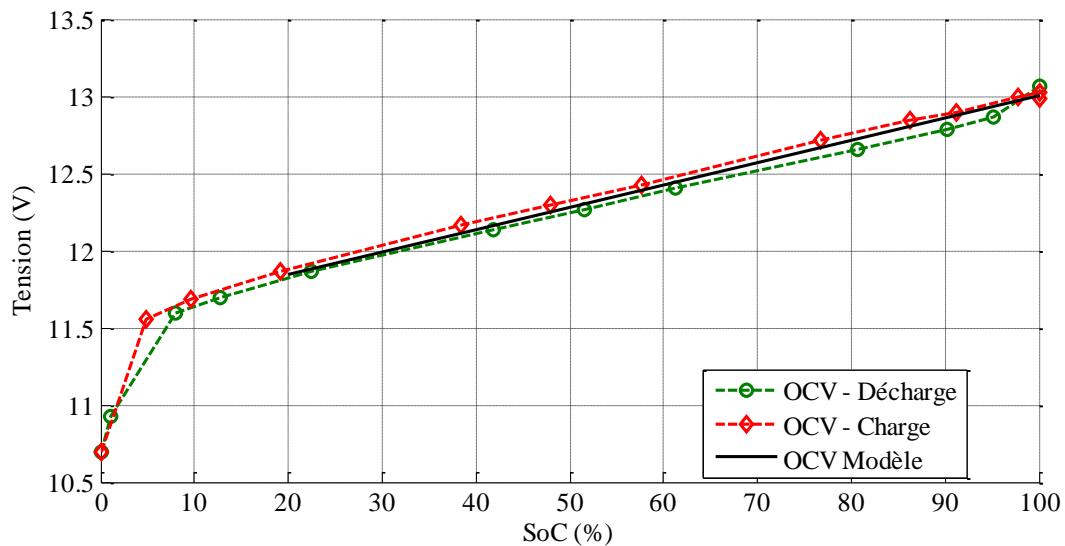


Figure 69 : La tension de la batterie en fonction de son état de charge

Pour un état de charge donnée entre 20% et 100%, l'évolution de la tension de la batterie en fonction de l'état de charge peut être modélisée par une droite affine :

$$E = 0,0146 \text{ SoC}[\%] + 11,55 \quad \text{eq. 49}$$

Avec ce modèle, l'augmentation de 1% de SoC dans la batterie entraîne une hausse de 14,6mV de la tension à vide de la batterie.

Une autre batterie a été testée pour valider cette loi, à savoir la batterie UK03, la température de la batterie était non régulée et d'environ 19°C (température ambiante). Pour un état de charge donnée entre 20% et 100%, l'évolution de la tension de la batterie en fonction de l'état de charge peut être modélisée par la droite suivante :

$$E = 0,0133 \text{ SoC}[\%] + 11,6 \quad \text{eq. 50}$$

Pour les deux exemples, les valeurs des deux modèles sont similaires. Avant de modéliser l'impédance interne de la batterie, nous voulons étudier d'abord la limitation en courant de recharge de la batterie. Cette limitation en courant de charge explique alors la difficulté de modéliser l'impédance de la batterie en charge.

3.3.4.2 La limitation du courant de charge

Nous avons vu dans le chapitre 2 l'importance de la récupération d'énergie dans le dimensionnement du stockage mixte. Pour quantifier l'acceptabilité de la batterie en recharge, nous avons réalisé l'essai suivant, de charge de la batterie à tension constante sans limitation du courant de charge.

Comme nous avons pu constater précédemment, le courant maximum d'une charge rapide ne dépasse pas 210A. Ce courant décroît rapidement lors de cette recharge rapide mais la température de la batterie augmente. Pour minimiser l'effet de la température interne de la batterie sur les réactions chimiques (= courant de recharge), la batterie a alors été rechargée en 8 séquences à partir d'un état de charge initial d'environ 0%. Une séquence est composée d'une recharge à tension maximale régulée (14,28V) permettant de recharger la batterie d'environ 10Ah-15Ah et suivie d'un temps de repos d'une heure permettant le refroidissement et l'homogénéisation de la température dans la batterie :

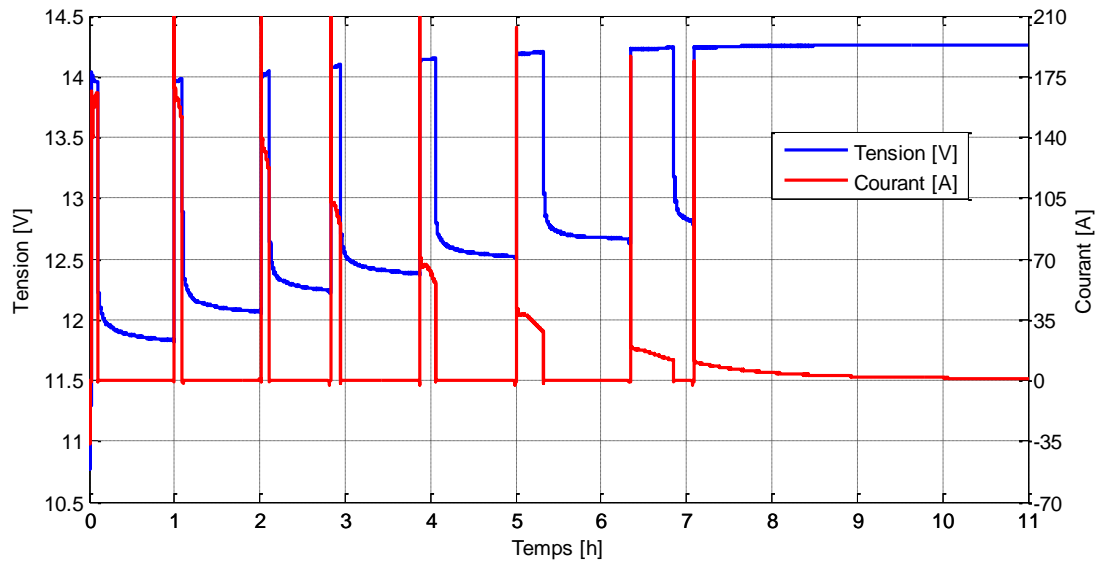


Figure 70 : Mesure du courant de limitation circulant dans la batterie lors d'une recharge rapide partielle

Sur une représentation du courant de recharge en fonction de l'état de charge (Figure 71) nous constatons que la batterie n'accepte qu'un courant de 60A lorsqu'elle est à un état de charge de 50% et à partir de 80% d'état de charge, la batterie n'accepte quasiment plus de courant de recharge important (courant < 10A) :

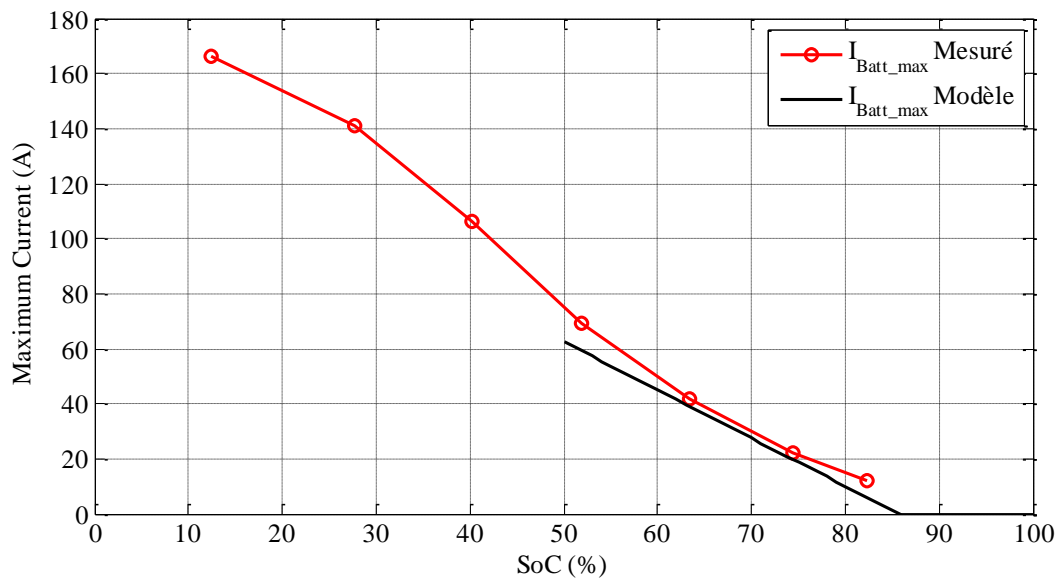


Figure 71 : Courant limite de charge en fonction de l'état de charge de la batterie

Sachant que la fenêtre d'utilisation du véhicule se situe entre 100%SoC et 50%SoC (en fin de journée), cette limitation peut être modélisée par deux droites. Pour notre modèle, il a été choisi d'approximer ce courant de charge par la formule suivante :

$$\begin{cases} I_{Batt_Max} = 140 - \frac{140}{85} SoC & \forall SoC \in [50\%, 85\%[\\ I_{Batt_Max} = 0A & \forall SoC \in [85\%, 100\%[\end{cases} \quad \text{eq. 51}$$

Sur la Figure 71, le courant maximum de charge affiché est la moyenne du courant circulant dans la batterie pendant la première minute de charge.

Cette limitation du courant en charge explique la difficulté de modéliser l'impédance de la batterie en charge.

3.3.4.3 La résistance de polarisation

Pour identifier la résistance de polarisation et l'impédance complexe, nous avons utilisé des créneaux de courant d'amplitudes différentes, de 1 à 200A, et d'une durée comprise entre cinq et une trentaine de seconde. Cette durée a été choisie sur les temps de réponse observés lors des différentes décharges partielles de la batterie :

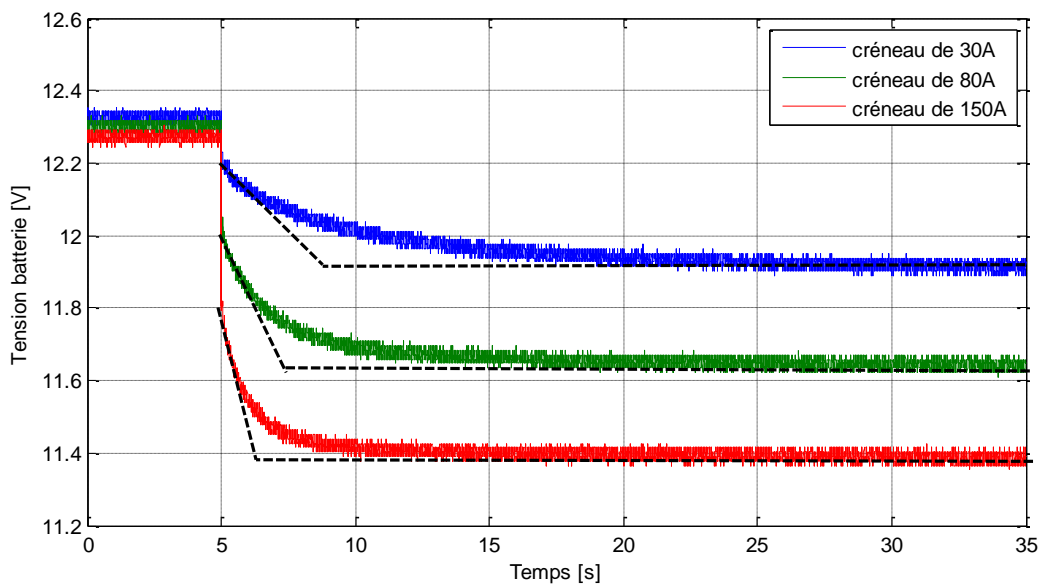


Figure 72 : Exemples de temps de réponse en tension à un créneau de courant (début du créneau à partir de t=5s)

L'impédance interne de la batterie est composée d'une résistance de polarisation et d'une impédance complexe. La résistance de polarisation représente les réactions chimiques agissant quasi-instantanément dans la batterie (temps de réponse < 100ms) et l'impédance complexe modélise l'effet des diffusions dans la batterie (temps de réponse de l'ordre de la seconde/minute).

Sur la Figure 73, la chute de tension due à la résistance de polarisation (ΔU_{Pol}) et la chute de tension due à la partie réelle de l'impédance de Warburg ($\Delta U_{Warburg}$) sont clairement identifiées :

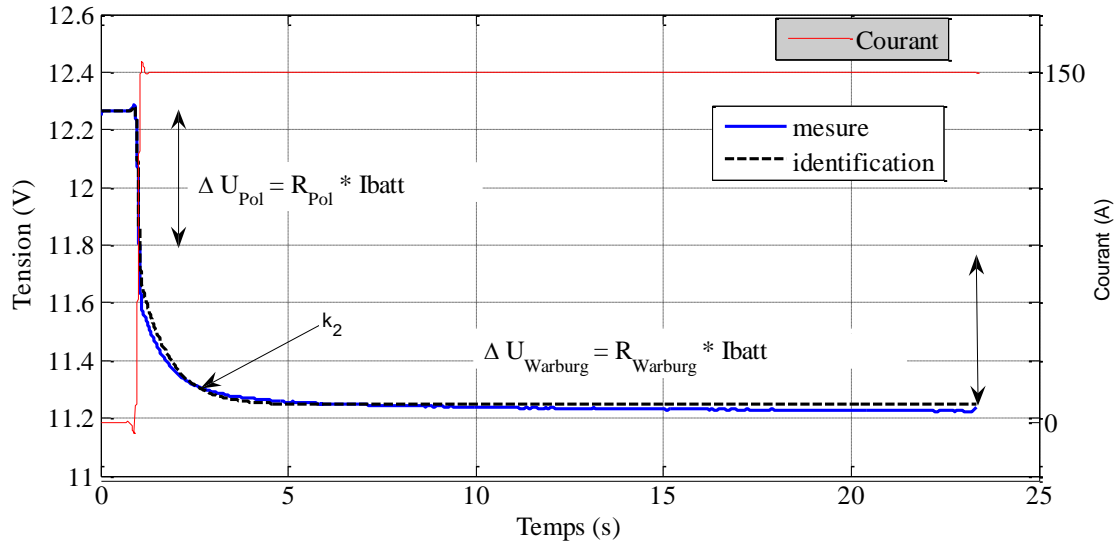


Figure 73 : Identification des 3 paramètres du modèle

Les caractéristiques des chutes des tensions ΔU_{Pol} et $\Delta U_{Warburg}$ sont fortement non-linéaires en fonction du courant et du SoC. Dans un premier temps, la chute de tension modélisée par la résistance de polarisation R_{Pol} sera caractérisée par des fonctions logarithmiques et l'impédance complexe Z_W sera approximée par une fonction logarithmique.

La résistance de polarisation est calculée à partir de la surtension ΔU_{Pol} . La chute de tension provoquée par le passage du courant a alors été approximée par une équation qui lie le logarithme de la chute de tension instantanée en fonction du logarithme du courant (eq. 52). L'état de charge influence la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite ainsi obtenue. L'hypothèse émise est que toutes les droites qui modélisent la charge de la batterie se croisent en un point (-1A, -280mV) afin de diminuer l'erreur. Pour la décharge (Figure 75) et la charge (Figure 74), les droites se croisent toutes en un point (200A, 800mV). Néanmoins, vu le faible nombre de points, ces droites peuvent être parallèles, l'erreur relative passe de $\pm 3\%$ à $\pm 6\%$.

$$\ln(\Delta U_{Pol}) = \ln(U_{r0}) + \alpha_r \ln|I_{Batt}| \quad \text{eq. 52}$$

$$R_{Pol} = \frac{\Delta U_{pol}}{I_{Batt}} \quad \text{eq. 53}$$

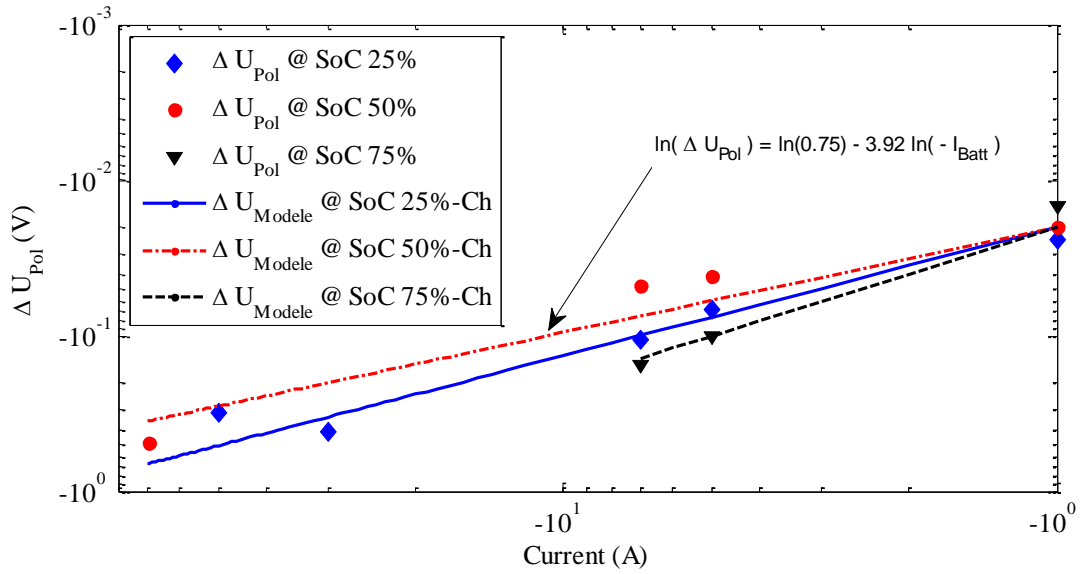


Figure 74 : La chute de tension ohmique en charge

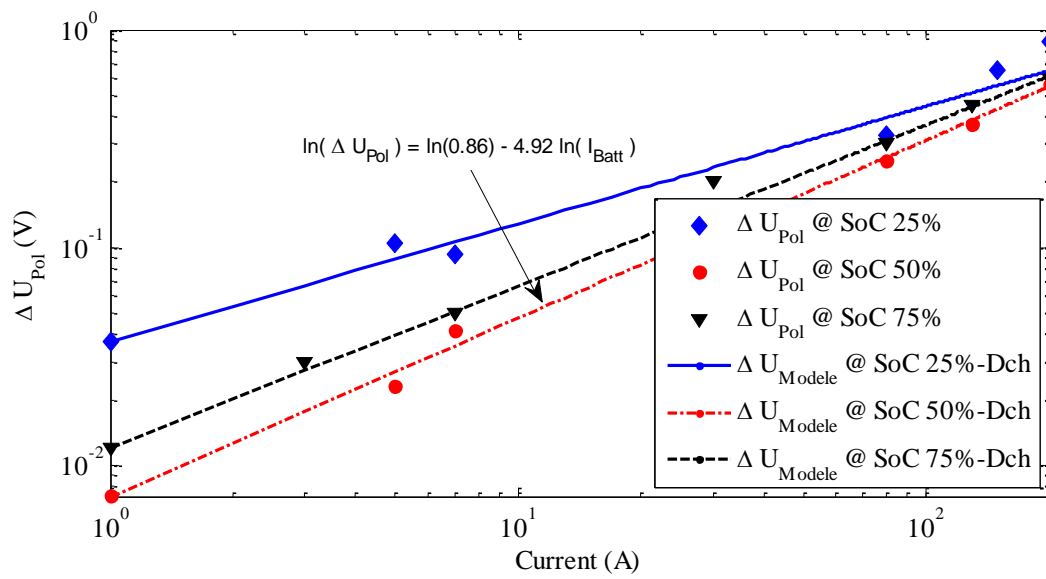


Figure 75 : La chute de tension ohmique en décharge

Du fait de la faible valeur de la résistance, l'erreur de mesure pour les faibles courants est très importante. La chute de tension augmentant lorsque le courant augmente, cette incertitude diminue grâce au changement de calibre des appareils et au changement de capteur de courant. Les erreurs de mesure sur la chute de tension ΔU_{pol} et la résistance R_{pol} sont illustrées sur la Figure 76 et la Figure 77.

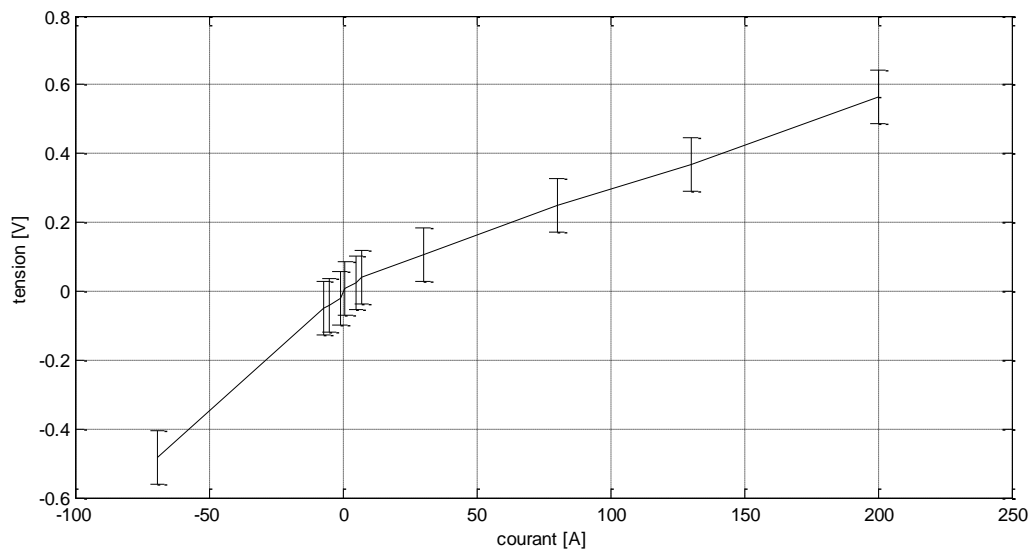


Figure 76 : Erreur de mesure de la chute de tension (batterie à 50% SoC)

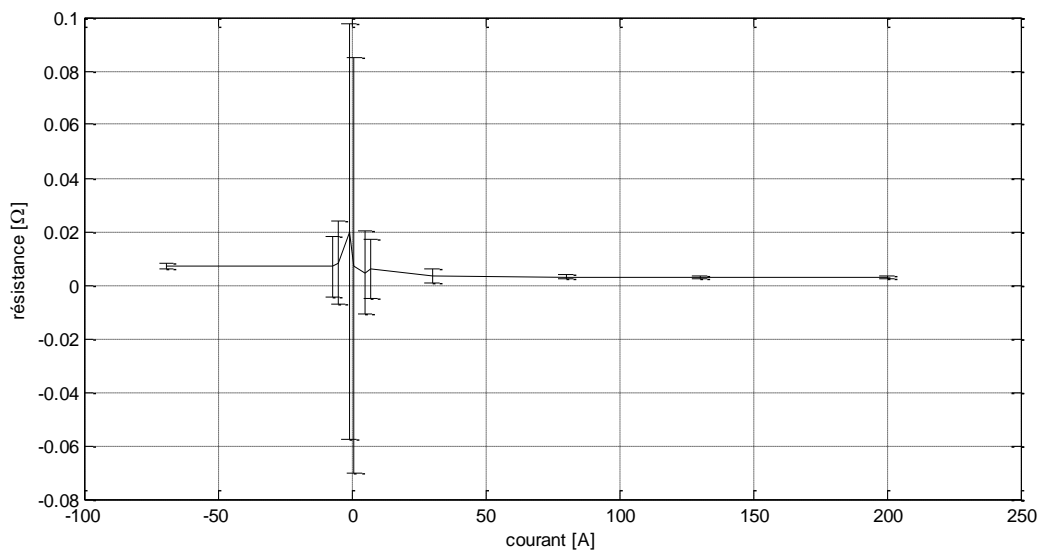


Figure 77 : Erreur de calcul de la résistance (batterie à 50% SoC)

3.3.4.4 L'impédance de diffusion $Z_{Warburg}$

L'impédance de diffusion, autrement appelée impédance de Warburg, a été identifiée à l'aide des mêmes créneaux de courant utilisés pour l'identification de la résistance de polarisation et détaillé précédemment.

Dans le modèle, cette impédance complexe est calculée à partir de la résistance $R_{Warburg}$ (eq. 55) et du paramètre k_2 (eq. 56). Ce dernier est identifié à partir de l'équation eq. 48 en connaissant les valeurs de R_n et de C , identifiés eux même à partir de l'équation de $\Delta U_{Warburg}$ représentant la chute de tension due à l'impédance de Warburg. La modélisation de cette impédance vérifie l'équation de la loi de Tafel (eq. 35). La chute de tension est exprimée en fonction du logarithme du courant circulant dans la batterie (eq. 54). Nous garderons la pente de la droite constante pour tous les états de charge de la batterie.

$$\Delta U_{Warburg} = U_{w0} + u_w \ln|I_{Batt}| \quad \text{eq. 54}$$

$$R_{Warburg} = \frac{\Delta U_{Warburg}}{I_{batt}} \quad \text{eq. 55}$$

Sur la Figure 78, le courant de charge est fortement limité par l'état de charge de la batterie. Par exemple, pour un état de charge de 75%, nous pouvons mesurer que deux points 1A et 7A. Il est impossible d'injecter dans la batterie un courant plus important pour affiner la droite pour les états de charge élevée sans activer des réactions d'électrolyse reconnaissables par le dépassement du seuil de 14,3V (surtension inférieure à 15V). En décharge (Figure 79), nous avons aucune limitation en courant et nous avons mesuré des courant jusqu'à 200A.

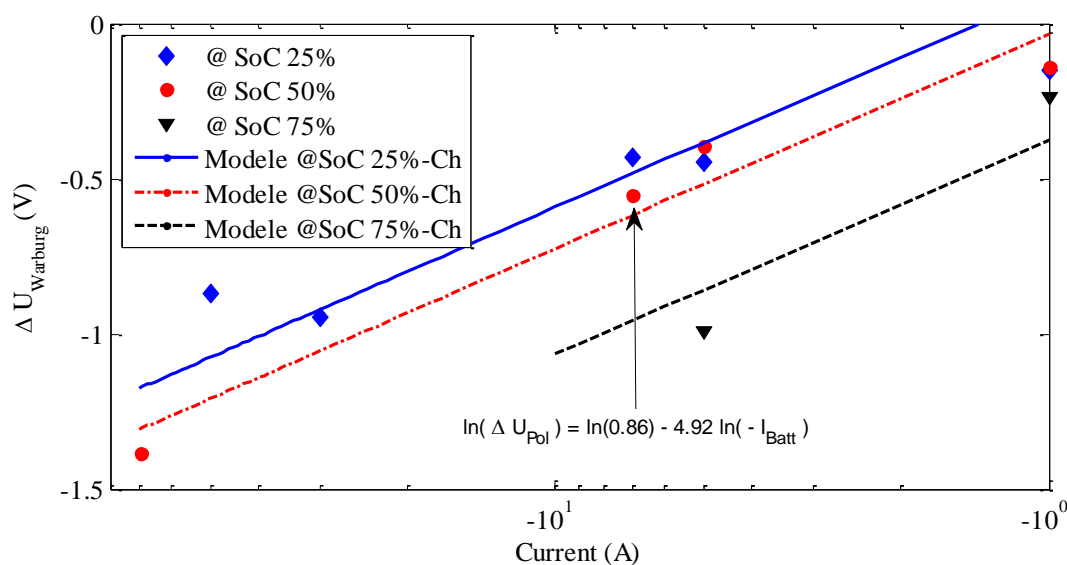


Figure 78 : La chute de tension due à l'impédance de Warburg en charge

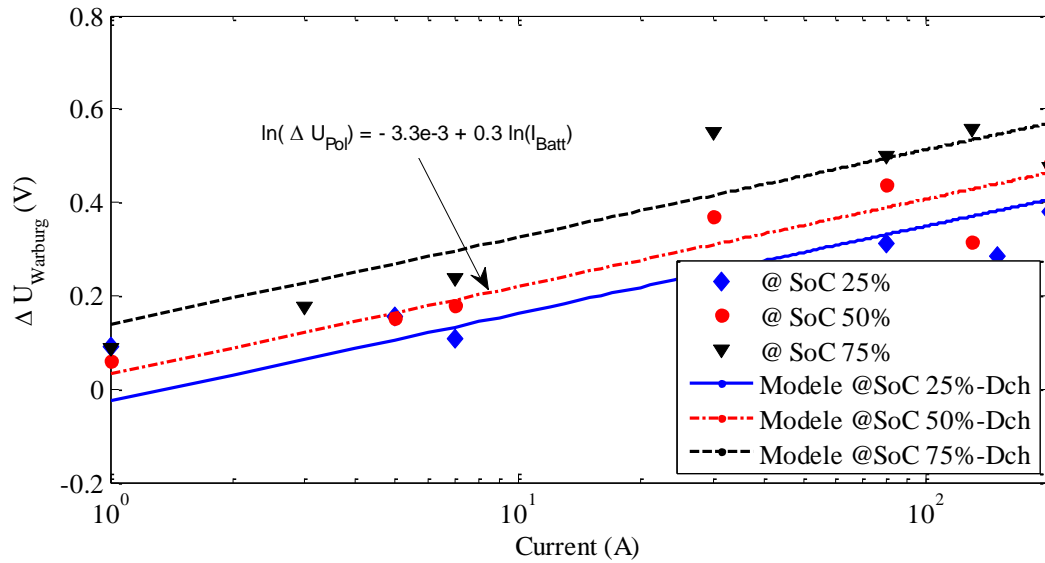


Figure 79 : chute de tension due à l'impédance de Warburg en décharge

L'identification du paramètre k_2 en décharge repose sur l'hypothèse qu'il n'est influencé que par le courant circulant dans la batterie. En charge, le paramètre k_2 est modélisé par une droite affine qui lie le paramètre k_2 au courant circulant dans la batterie et à son état de charge (Figure 80 et eq. 57) et pour la décharge, il sera modélisé par une fonction logarithmique qui le lie simplement au courant (Figure 81 et eq. 56) :

$$\ln(k_2) = \ln(k_{2,0}) + \alpha_{k_2} \ln|I_{Batt}| \quad \text{eq. 56}$$

$$\ln(k_2) = k_{2,0} + \alpha_{k_2} I_{Batt} \quad \text{eq. 57}$$

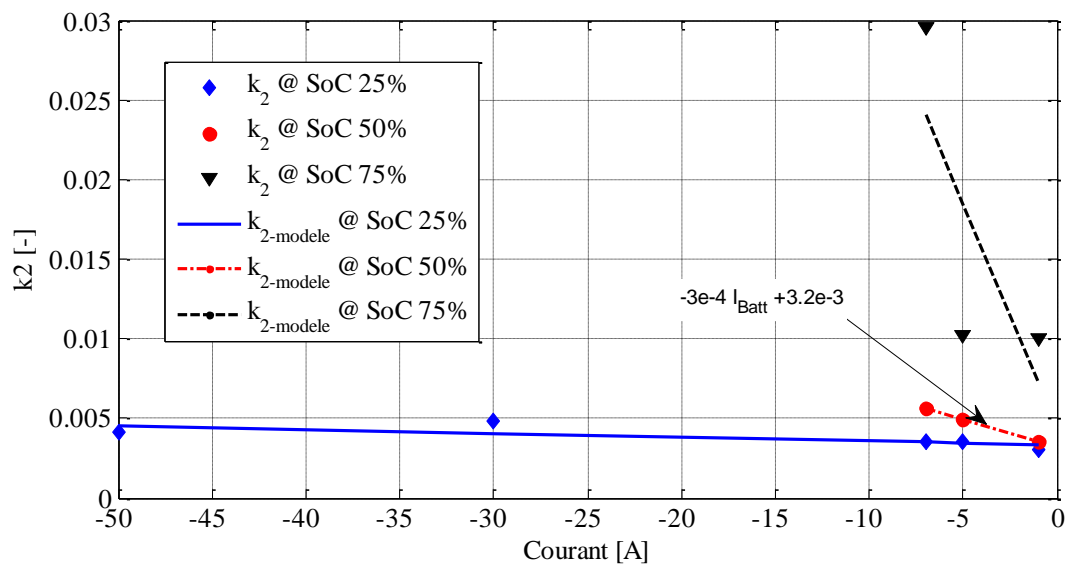


Figure 80 : k_2 en charge

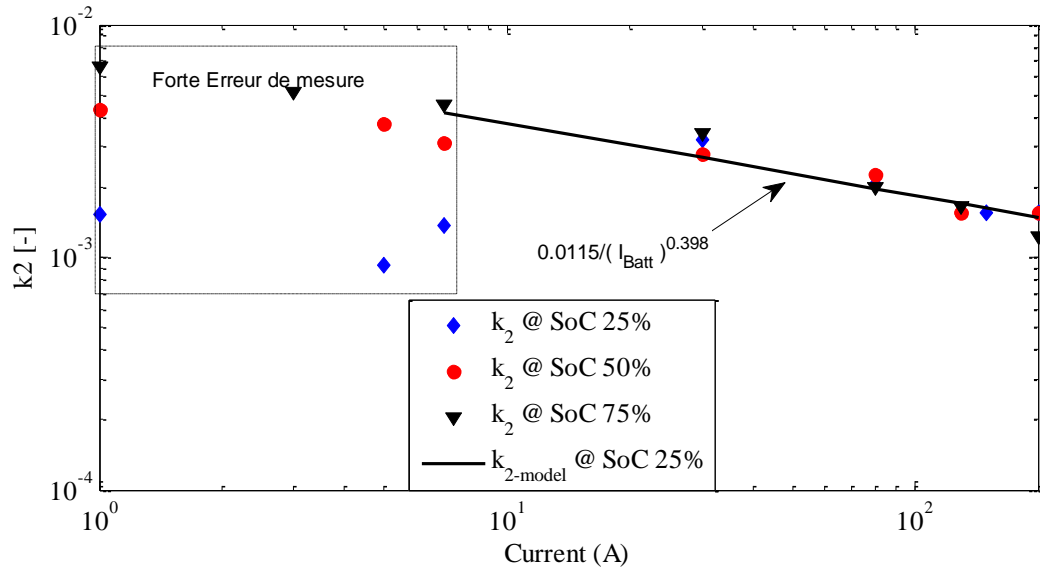


Figure 81 : k_2 en décharge

Les erreurs de mesure sur la tension et la résistance sont illustrées Figure 83 et Figure 82. Nous remarquons la très forte non-symétrie entre la décharge et charge de la batterie au niveau de l'impédance de Warburg.

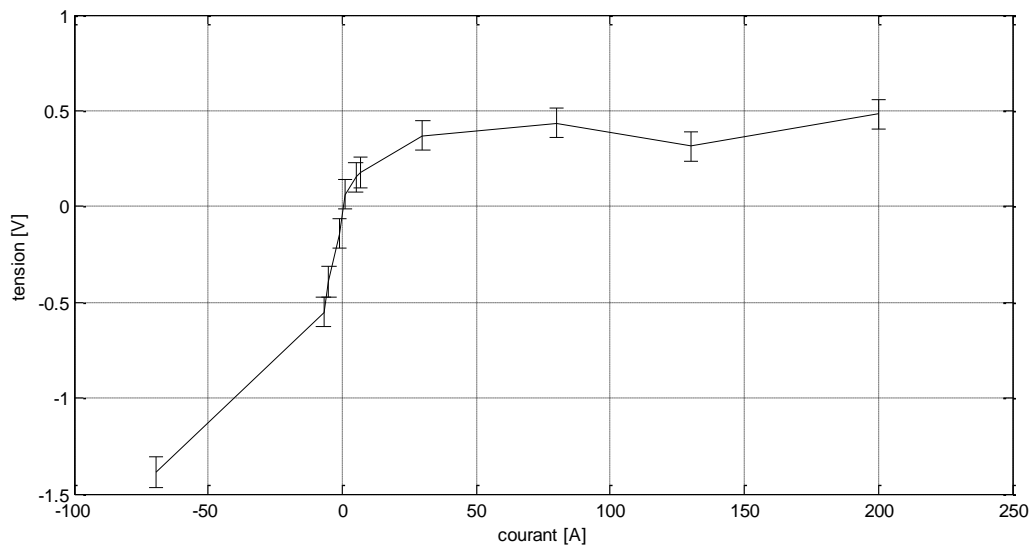


Figure 82 : Erreur de mesure de la chute de tension due à l'impédance de Warburg (batterie à 50% SoC)

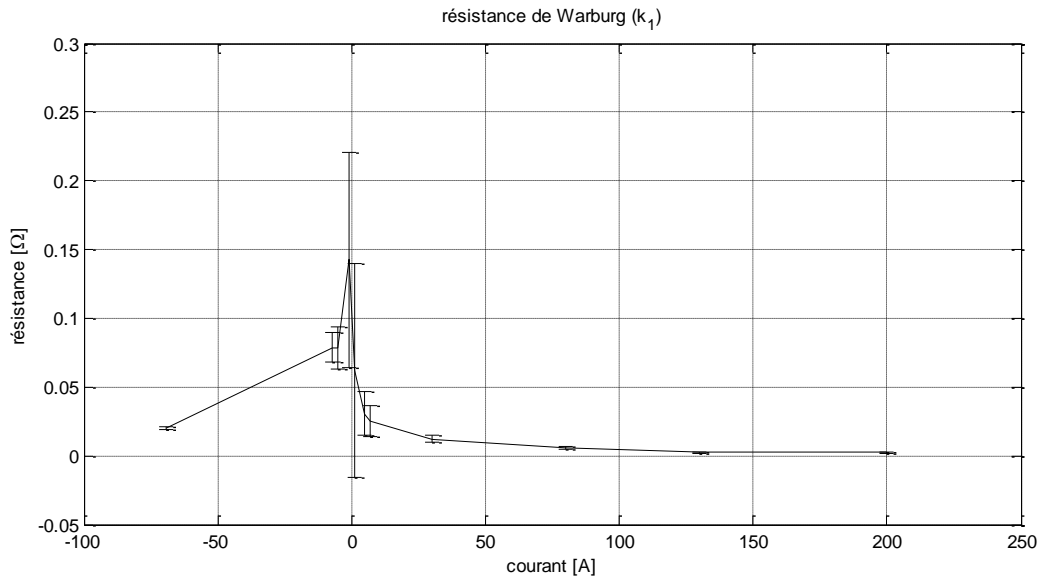


Figure 83 : Erreur de calcul de l'impédance de Warburg (batterie à 50% SoC)

3.3.4.5 Évolution des impédances de la batterie en fonction de l'état de charge

C'est l'essai de la détermination de la tension à vide de la batterie en fonction de l'état de charge (Figure 84) qui nous a permis de lier l'évolution des paramètres α_r et U_{r0} (eq. 52) et U_{w0} (eq. 54) en fonction de l'état de charge. En effet, les différents états de charge ont été obtenus avec un courant de $\pm 10A$. L'hypothèse forte est de considérer qu'à un courant donné, la chute de tension de polarisation représente toujours le même pourcentage de la chute de tension totale observée aux bornes de la batterie et ce quelque soit l'état de charge. Ce pourcentage est quasi constant pour les 3 états de charge mesurés.

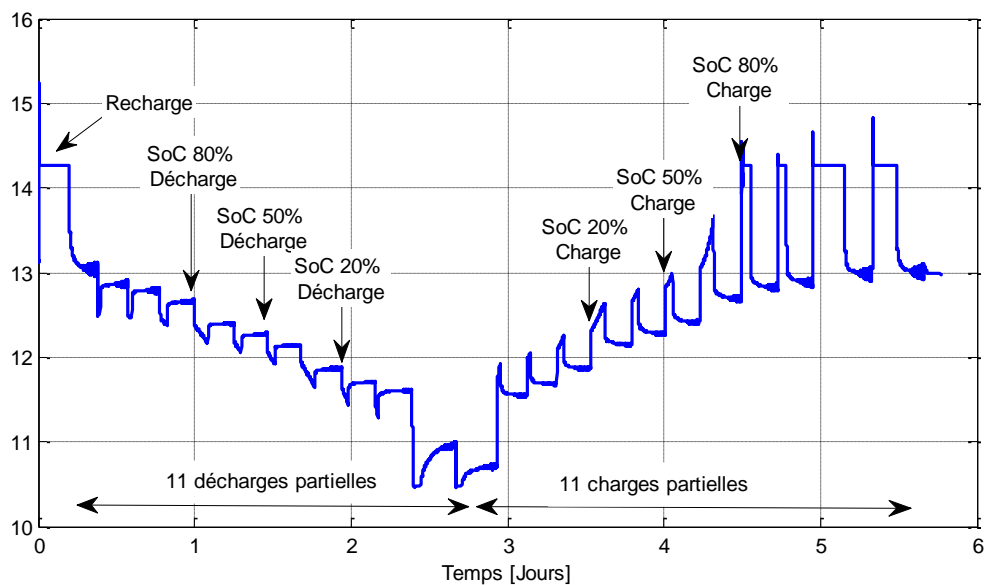


Figure 84 : Tension lors de l'essai l'identification de la tension à vide

Pour un courant de 10A et en utilisant l'identification faites précédemment, il a été observé pour 25%, 50% et 75% d'état de charge que le rapport entre la chute de tension de polarisation ΔU_{Pol} et la chute de tension de Warburg $\Delta U_{Warburg}$ reste quasi constant :

Etat de charge (Décharge)	25%	50%	75%	Valeur Choisie
Rapport $U_{Pol}/U_{Warburg}$	23%	20%	21%	21 %

Etat de charge (Charge)	25%	50%	75%	Valeur Choisie
Rapport $U_{Pol}/U_{Warburg}$	11%	9%	7%	9 %

Lorsque le courant de 10A circule dans la batterie et que son état de charge est estimé en temps réel, la différence de tension est répartie selon la valeur ainsi choisie. Ensuite les données brutes sont simplifiées par une équation du 3° ordre.

Il est à noter qu'en charge pour un état de charge compris entre 80% et 100% (Figure 85), le chargeur de batterie étant en régulateur de tension, le courant circulant dans la batterie n'est plus de 10A. le rapport entre la chute de tension de polarisation ΔU_{Pol} et la chute de tension de Warburg $\Delta U_{Warburg}$ n'est plus valide.

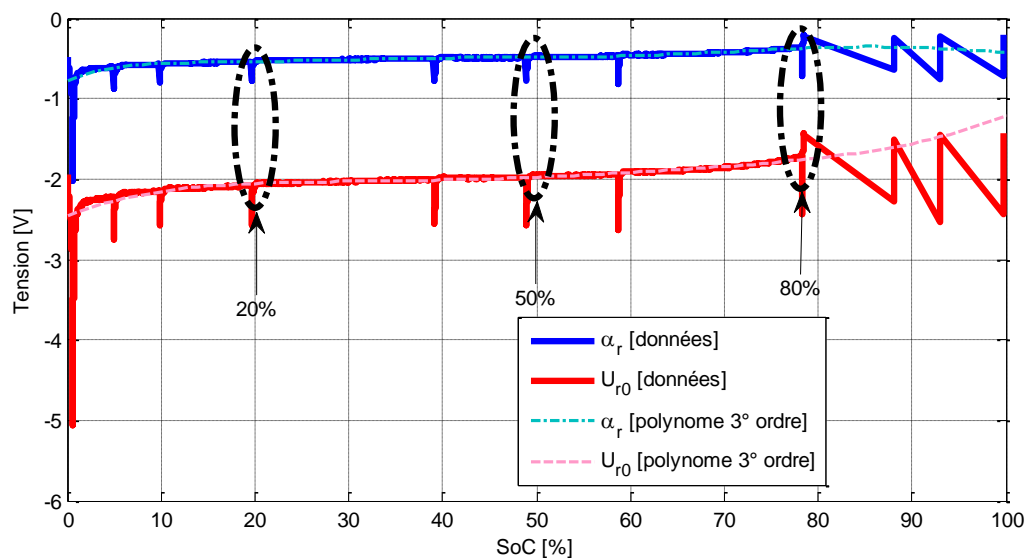


Figure 85 : Evolution des paramètres du modèle de la résistance de polarisation en charge

La même remarque peut être faite pour la décharge (Figure 86), car entre 0% et 10%, le courant n'est plus de 10A. le rapport entre la chute de tension de polarisation ΔU_{Pol} et la chute de tension de Warburg $\Delta U_{Warburg}$ n'est plus valide.

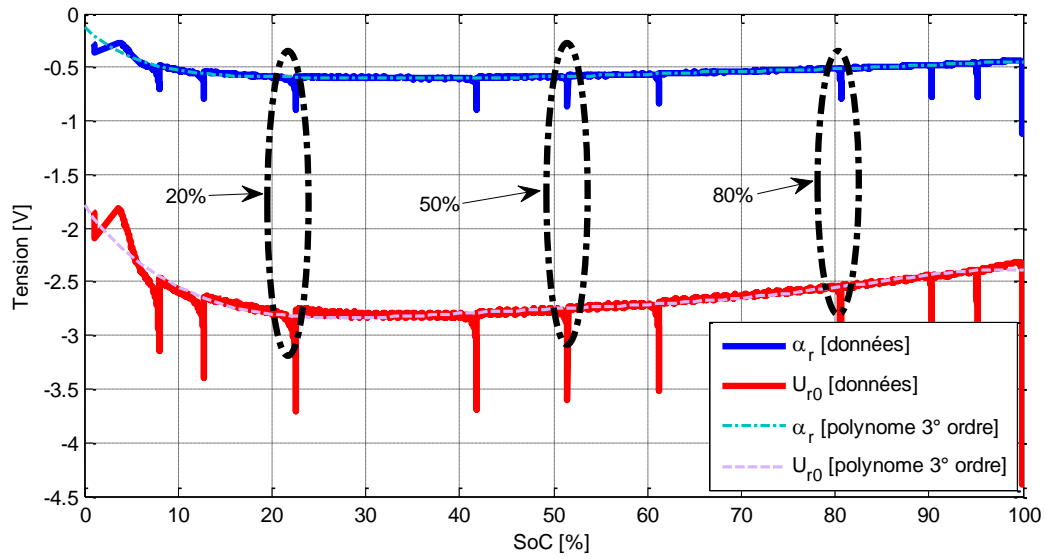


Figure 86 : Evolution des paramètres du modèle de la résistance de polarisation en décharge

Des remarques identiques peuvent être faites sur les deux figures suivantes. Pour la décharge, la zone de 80% et 100% est moins flagrante que précédemment. La zone de décharge profonde de la batterie, entre 0% et 10% est maintenant difficilement modélisable.

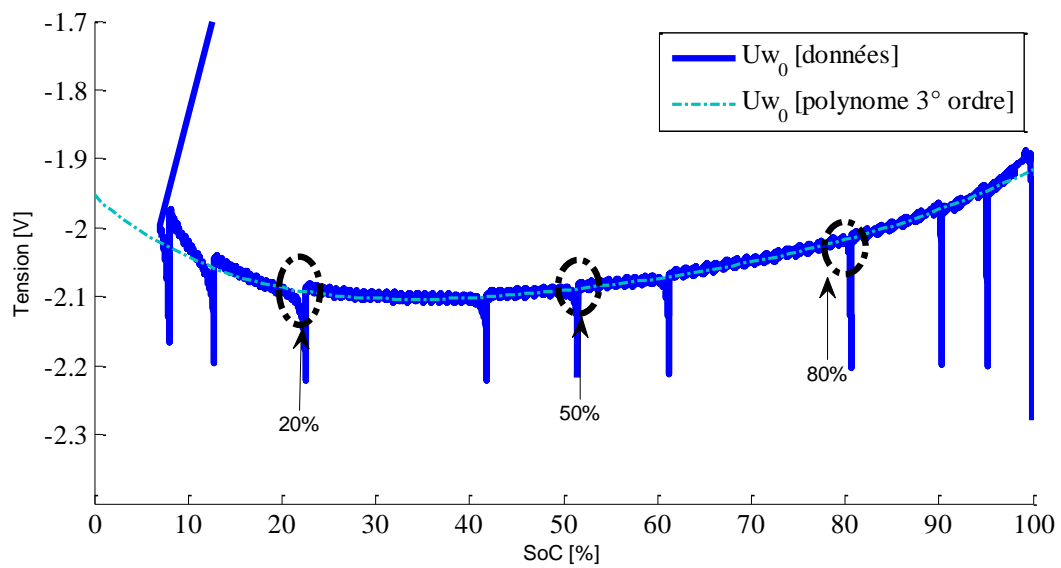


Figure 87 : Evolution du paramètre U_{w0} de l'impédance de Warburg en charge

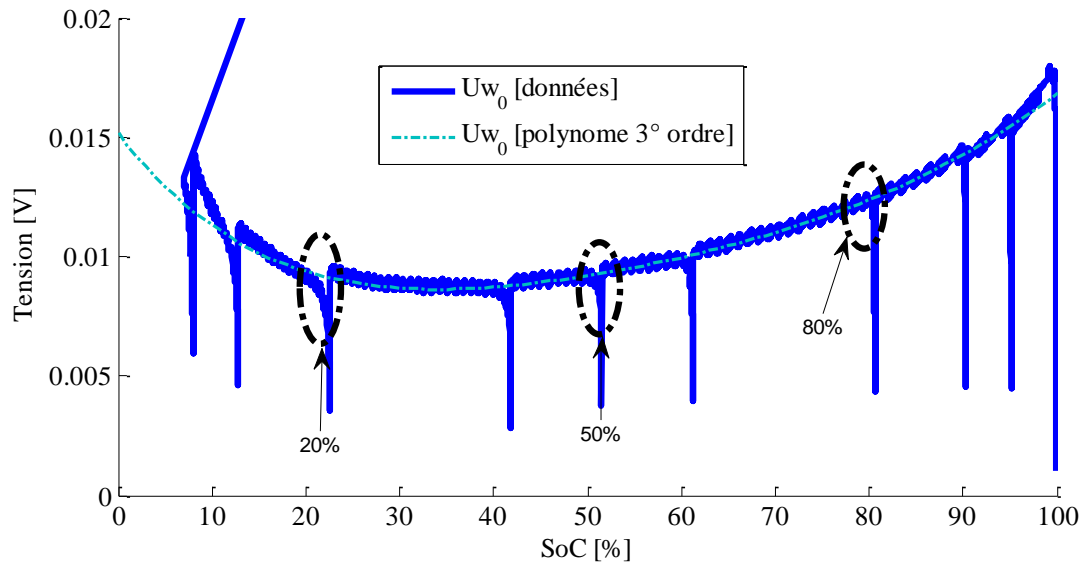


Figure 88 : Evolution du paramètre U_{w0} de l'impédance de Warburg en décharge

Le modèle a été implémenté sous forme d'une « s-fonction » sous Matlab/Simulink (procédure d'intégration Euler à pas constant) de la manière suivante :

A chaque instant $t=k$, après l'acquisition de la variable d'entrée (le courant de la batterie) le premier pas est d'estimer le futur état de charge de la batterie (par l'intégration du courant) et de calculer la nouvelle tension à vide. Le calcul de la résistance de polarisation se fait en fonction du sens du courant (en charge ou en décharge) mais ne pose pas de difficultés majeures. Il faut juste mentionner qu'en charge, le courant est d'abord limité en fonction de l'état de charge, à l'extérieur de la « s-fonction ».

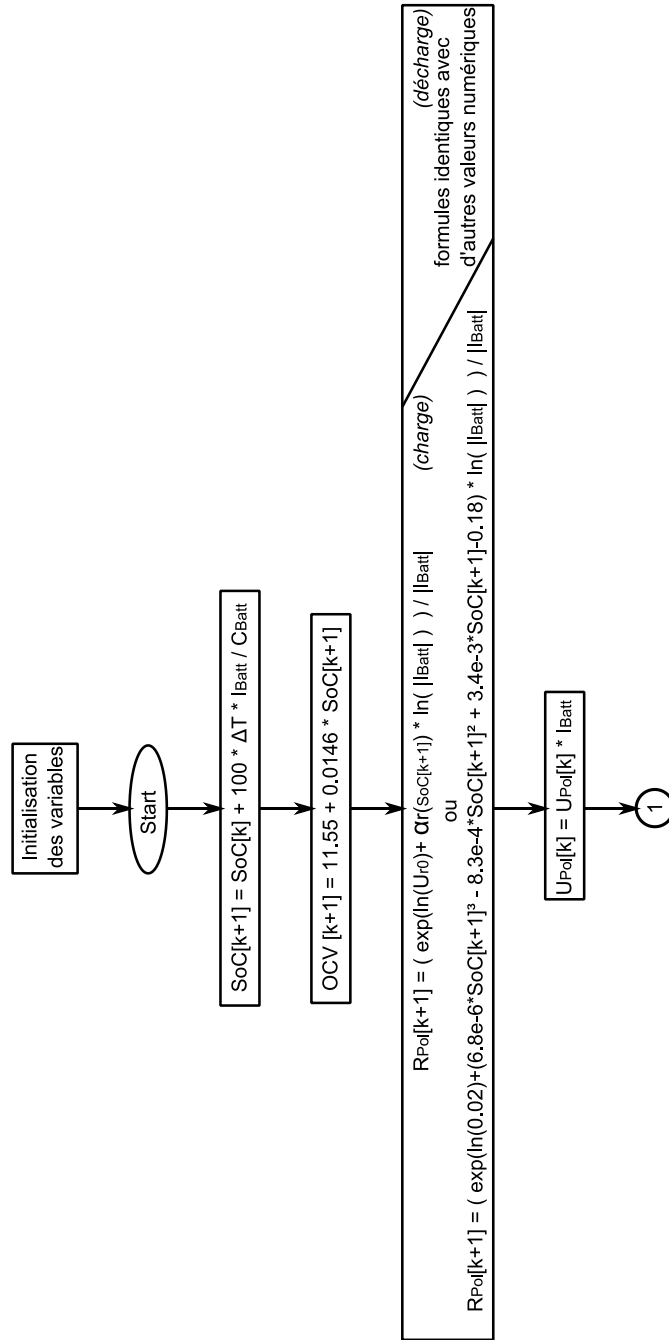
Après le calcul de la chute de tension due à la résistance de polarisation, nous passons au calcul des chutes de tensions dues aux quatre cellules RC (modélisation de l'impédance de Warburg). Comme ce calcul est identique, sur la Figure 90 nous avons illustré uniquement le calcul de la première cellule.

La première étape dans le calcul de la chute de tension d'une cellule RC est le calcul des valeurs de la résistance et de la capacité en fonction des valeurs des paramètres k_1 et k_2 à l'instant k . Comme la valeur initiale de la tension de la cellule a été initialisée, nous disposons également de la tension aux bornes de la cellule. Il est donc relativement facile de calculer ensuite le courant de la branche résistive et celui dans le condensateur afin de réactualiser la tension de la cellule.

La deuxième étape consiste dans la réactualisation des paramètres k_1 et k_2 , pour l'instant de temps $k+1$. Ces paramètres dépendent de l'état de charge et du courant circulant dans la batterie. Dans le cas où le courant dans la batterie est nul (« relaxation ») nous avons fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de transfert de charge entre les cellules et donc chaque condensateur se décharge sur sa résistance. Dans ce cas, nous réactualisons k_1 et k_2 en fonction du courant circulant dans chaque couple RC. Cela voudrait dire que l'évolution de k_1 et k_2 est différente pour chaque cellule RC (en fonction de chaque courant) mais les lois générales de variation de k_1 et k_2 sont les mêmes pour les quatre cellules.

La mise à jour des valeurs de la résistance et de la capacité d'une cellule RC en fonction des valeurs des paramètres k_1 et k_2 à l'instant $k+1$ se fait uniquement dans le cas de la présence d'un courant dans la batterie. Cette remise à jour est utile uniquement en cas d'une variation très importante de courant entre 2 instants d'échantillonnage. Il nous protège d'une variation brutale des paramètres R et C. S'il n'y a pas de variation brutale du courant entre deux instants d'échantillonnage le ré-calcul supplémentaire fournit quasiment les mêmes valeurs que le calcul du pas 4.1.

Après le calcul des autres cellules RC, la somme de la tension à vide, chute de tension de polarisation et des tensions sur les condensateurs de l'impédance de Warburg nous fournissent la tension estimée de la batterie. Sur la Figure 89 et la Figure 90 nous avons indiqué aussi les équations utilisées dans les différents calculs et les figures auxquelles il faut se reporter afin de voir l'évolution des divers paramètres.



Pas n°1 : Calcul de l'état de charge

Pas n°2 : Calcul de la tension a vide (eq. 49 , fig 69)

Pas n°3 : Calcul de la résistance Rp0l (eq. 52 et 53 , fig 74 et 75)

Figure 89 : L'algorithm du modèle (Partie 1)

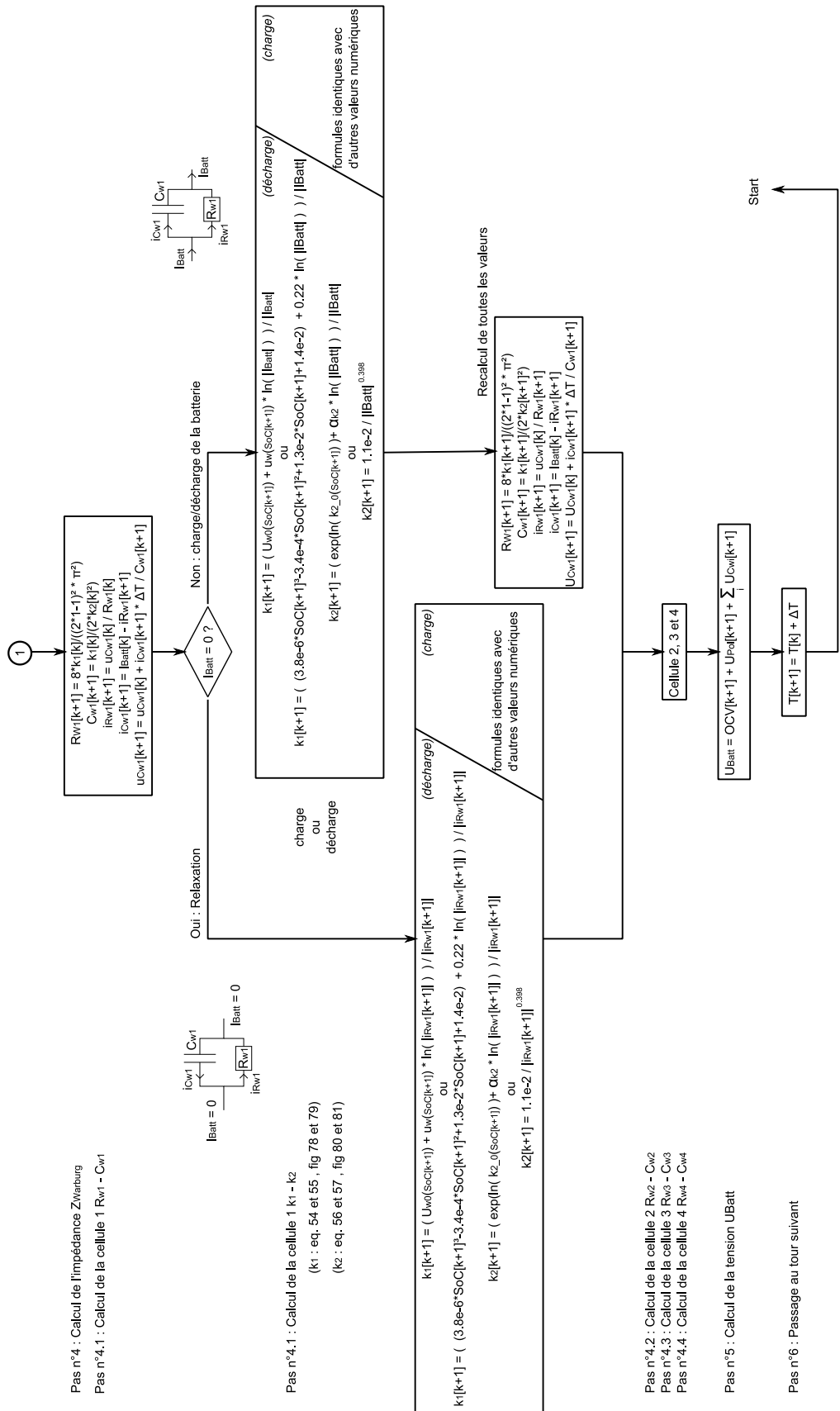


Figure 90 : L'algorithm du modèle (Partie 2)

3.3.5 La validation du modèle et domaine de validité

Le modèle de la batterie a été validé sur des créneaux de courant (comme ceux de la Figure 91 et Figure 93) pour plusieurs états de charge donnés. Il en résulte une erreur relative maximale de l'ordre de $\pm 1,5\%$ pour la décharge de la batterie (Figure 92) et de l'ordre de $\pm 4\%$ pour la charge de la batterie (Figure 94).

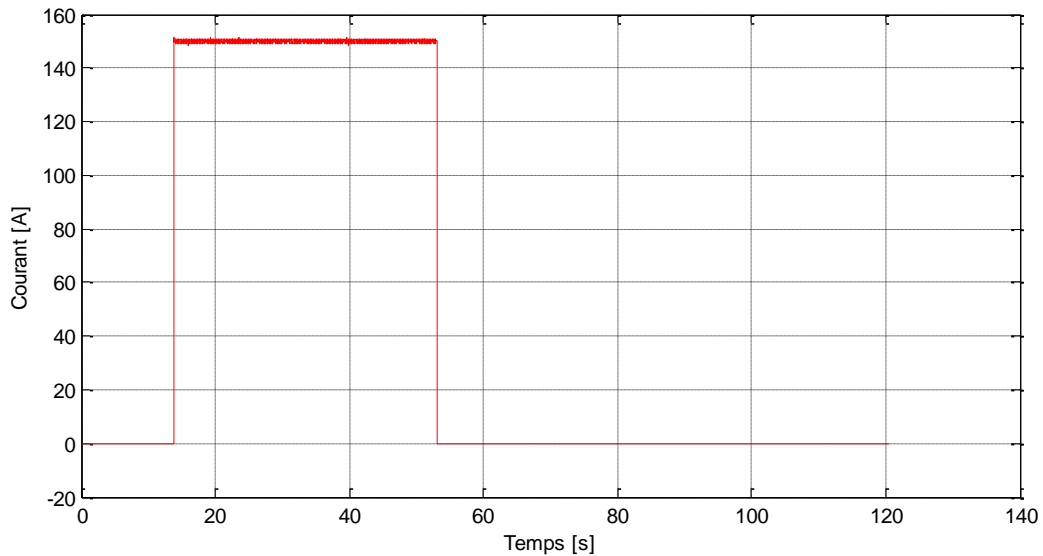


Figure 91 : Profil de courant de 150A [décharge 50%SoC]

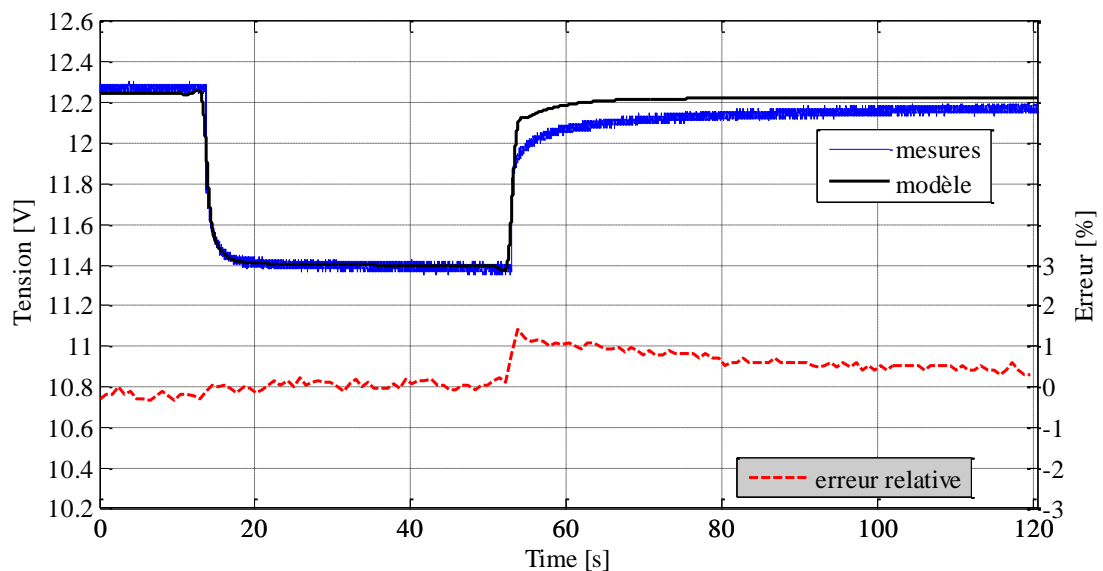


Figure 92 : Comparatif entre la simulation et la réalité pour un créneau de courant de 150A et pour un état de charge de 50% [décharge]

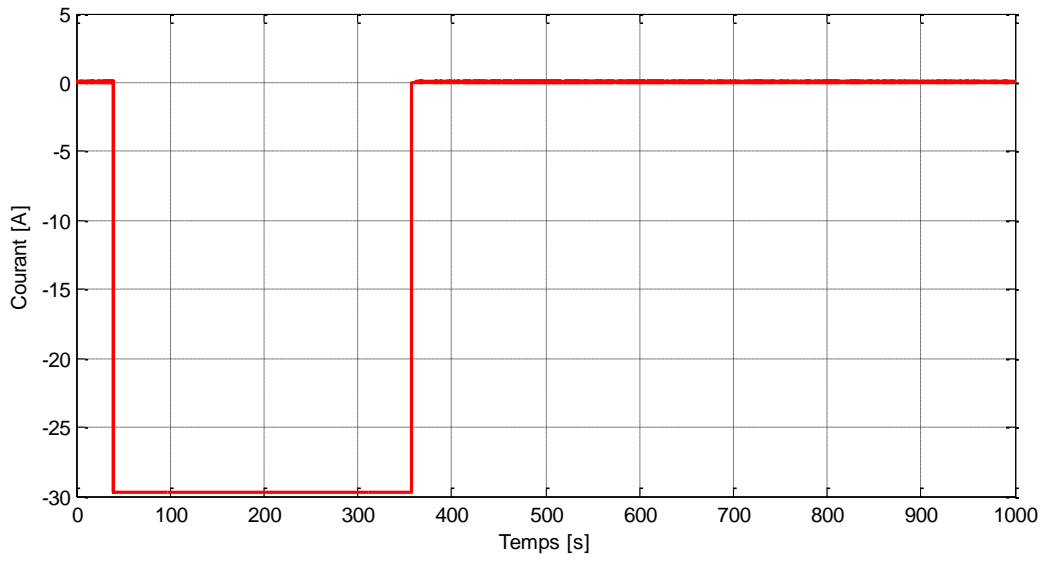


Figure 93 : Profil de courant de 30A [charge 25%SoC]

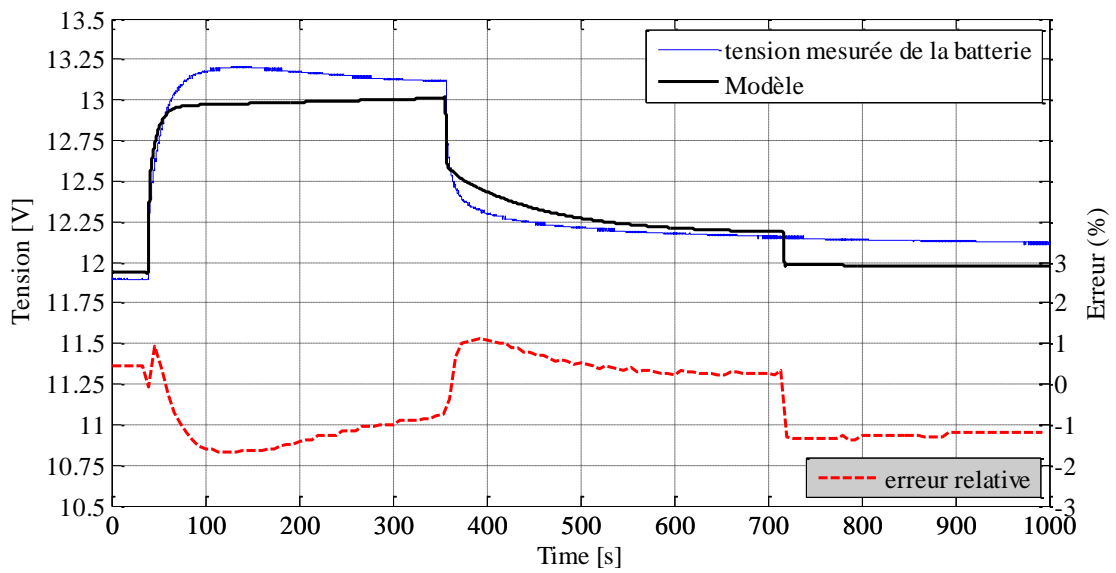


Figure 94 : Comparatif entre la simulation et la réalité pour un créneau de courant de 30A et pour un état de charge de 25% [charge]

D'autres essais, des profils de courant longue durée de 5min et 10min (Figure 95), ont permis de valider le fonctionnement du modèle. Un de ces essais est présenté sur la Figure 96. Dans ce cas, l'erreur relative est de l'ordre de $\pm 1\%$ lors du passage du courant, et de 3% lorsque la batterie est au repos.

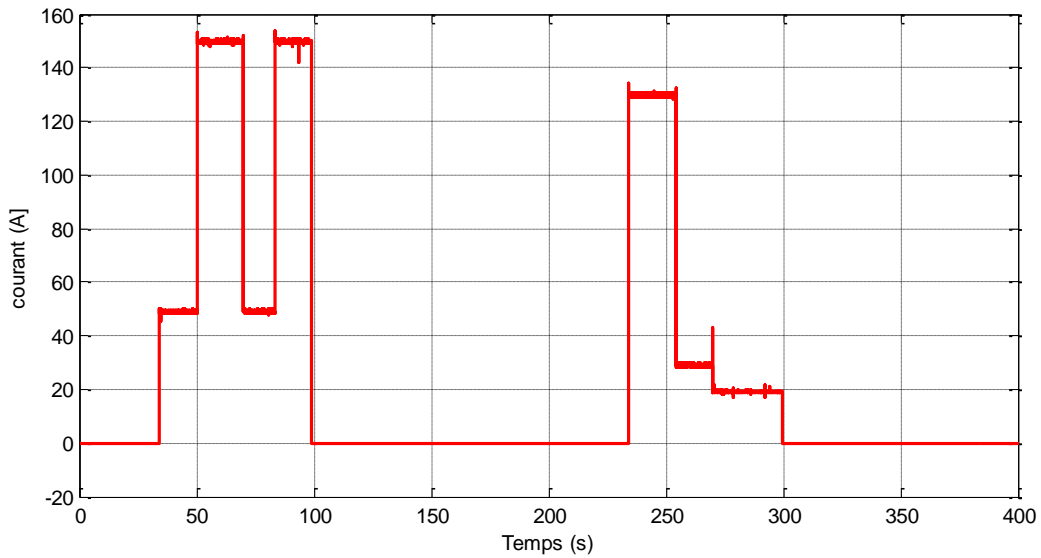


Figure 95 : Profil de courant longue durée [décharge 75%SoC]

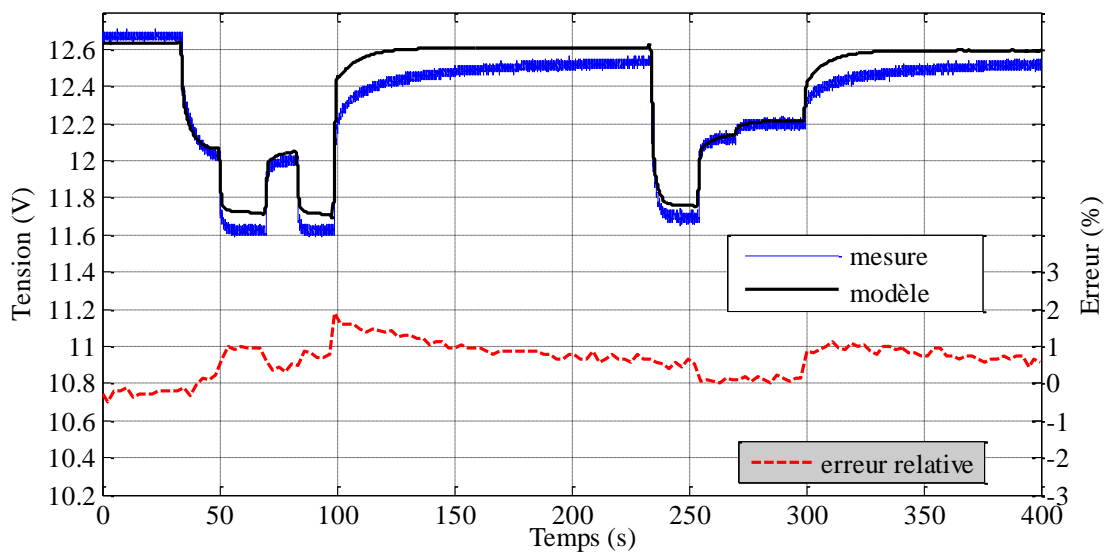


Figure 96 : Résultats expérimentaux et de simulation du profil de courant [décharge]

3.4 Conclusions

Dans le chapitre 2 nous avons mis en évidence la nécessité d'avoir un modèle de batterie au plomb plus fin et qui prend en compte l'acceptabilité en courant de recharge. Par modèle « plus fin » nous entendons un modèle qui reproduit mieux la dynamique de la tension de la batterie. L'utilité d'une dynamique bien estimée justifiée par les nombreux schémas de contrôle qui utilisent la tension comme sécurité dans l'utilisation d'une batterie. Il est également très utile de bien estimer la tension d'une batterie pour éviter des décharges profondes dans l'utilisation quotidienne.

Dans le chapitre 3 nous avons présenté un modèle de batterie au plomb qui dépend de la valeur et du sens du courant et de l'état de charge de la batterie.

Le modèle proposé fait partie de la « famille » des modèles à constantes localisées, un modèle de type circuit de Randles. Il est composé d'une résistance de polarisation, une impédance de Warburg et une source de tension commandée en fonction de l'état de charge de la batterie.

La résistance de polarisation modélise la chute ohmique et le phénomène de double couche – phénomène négligeable pour notre batterie par rapport au phénomène de diffusion. L'impédance de Warburg, qui modélise la diffusion, est approximée par quatre cellules RC en série. Les paramètres de la résistance de polarisation ainsi que les résistances et condensateurs de l'impédance de Warburg dépendent du courant, son sens (charge ou décharge) et de l'état de charge de la batterie.

Une procédure d'identification de ces paramètres est proposée et le modèle est validé expérimentalement pour plusieurs créneaux de courant. L'erreur obtenue est suffisamment petite dans la plage d'utilisation de notre modèle.

Le modèle a été établi pour seulement une des 20 batteries que nous avons dû gérer. Pour les 19 autres, nous avons vérifié la résistance interne (au sens du constructeur) et la capacité, dans la perspective d'un vieillissement accéléré par cyclage des batteries. Les conditions et l'objectif du cyclage seront présentés dans le chapitre suivant.

4 Stockage mixte

Dans ce chapitre nous allons montrer l'influence du modèle fin sur les « performances » de la benne à ordures mais aussi sur le dimensionnement du stockage mixte, le pack de supercondensateurs et la batterie.

Le deuxième aspect présenté dans ce chapitre concerne la durée de vie des batteries. Nous voulons montrer qu'un des avantages de l'association des supercondensateurs avec les batteries au plomb est l'augmentation de la durée de vie de ces dernières. Pour démontrer cela nous avons mis au point un cyclage comparatif sur un banc d'essais.

4.1 Simulation de la BOM avec le modèle fin

Afin de mettre en évidence l'importance d'un modèle fin de batterie, nous montrons sur la Figure 97 et la Figure 98 la simulation des 350 premières secondes de la phase de collecte du cycle ARTEMIS avec une benne alimentée uniquement par la batterie. Ensuite, sur la Figure 100 et la Figure 101 nous allons illustrer l'influence du modèle fin sur la modélisation de la BOM alimentée par le stockage mixte. L'influence du modèle fin est illustrée au niveau de la dynamique de la tension mais aussi du point de vue énergétique, pour chaque cas (benne alimentée sur batterie seule ou BOM avec stockage mixte).

Sur la Figure 97 et la Figure 98, nous présentons la simulation de la BOM alimentée par la batterie seule, pour deux états de charge (100%SoC et 50%SoC). Ces simulations sont à comparer avec celle présentée dans le chapitre 2.4 (Figure 33) qui utilise un modèle E-r de la batterie.

Pour un état de charge de 100%, avec le modèle fin, la batterie n'accepte pas des recharges en courant : il n'y a pas de courant « négatif » sur la Figure 97, ce qui n'est pas le cas sur la Figure 33. La conséquence immédiate est perçue sur la tension de la batterie, ou la tension ne remonte plus à des niveaux assez hauts. De plus, la présence des condensateurs dans le modèle fin fait que les temps de réponse sont complètement différents.

Pour un état de charge de 75%, le comportement du courant global des deux modèles se rapproche, même si avec le modèle fin une limitation du courant de recharge est apercevable à $t=48s$. Cette limitation disparaîtra si la batterie est encore plus déchargée (SoC de 50%, par exemple).

Il est clair d'après ces figures que la dynamique de la batterie au plomb est très différente selon le modèle utilisé. L'influence de cette dynamique pourrait être importante sur la stratégie de contrôle commande si celle-ci se base sur la tension de la batterie.

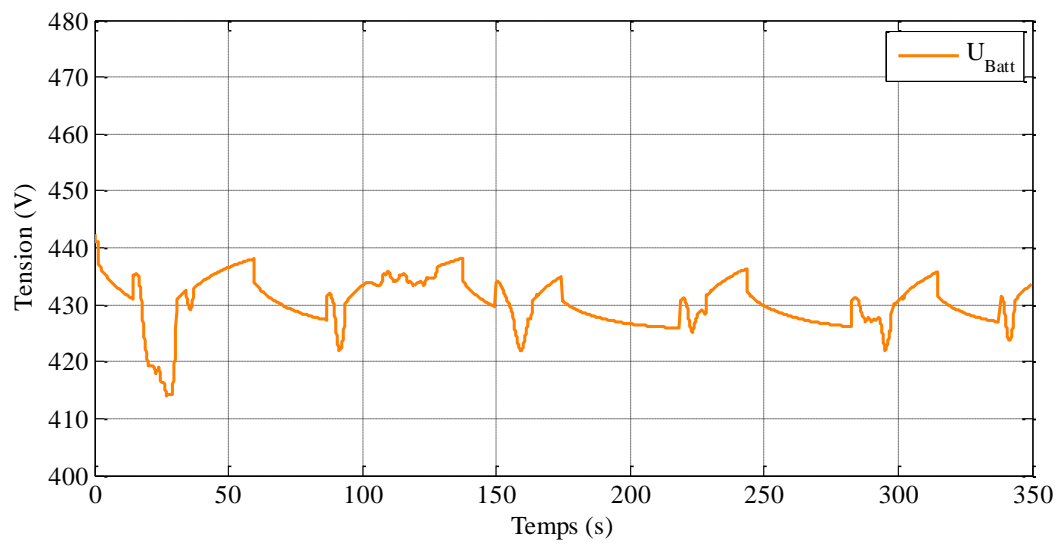
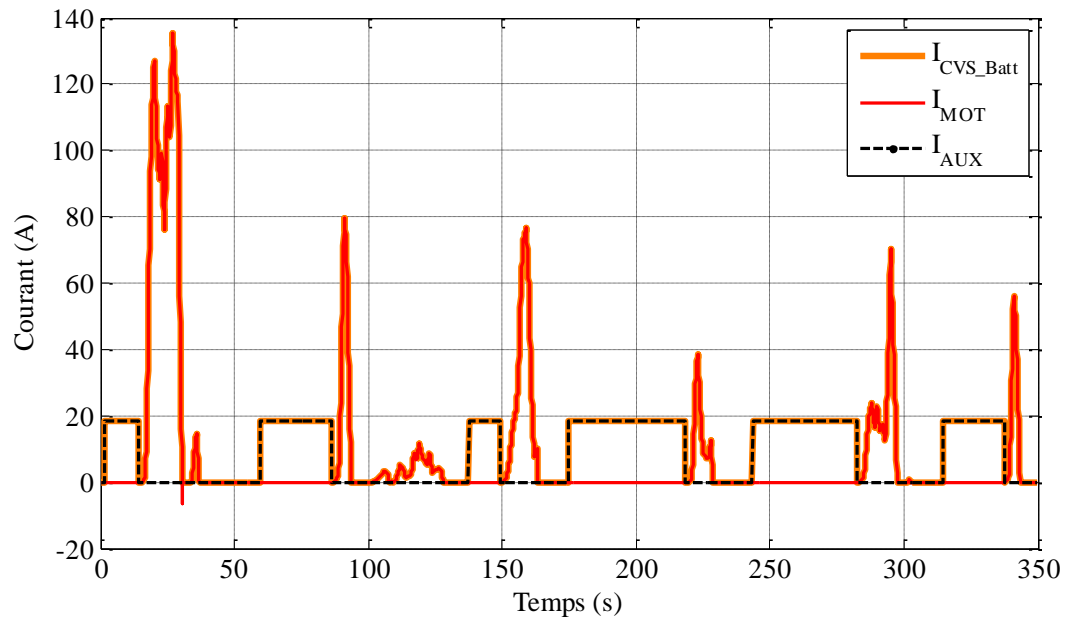


Figure 97 : Simulation de la BOM sur batterie seule – non-assistée ; hypothèses : modèle fin batterie, SoC 100%

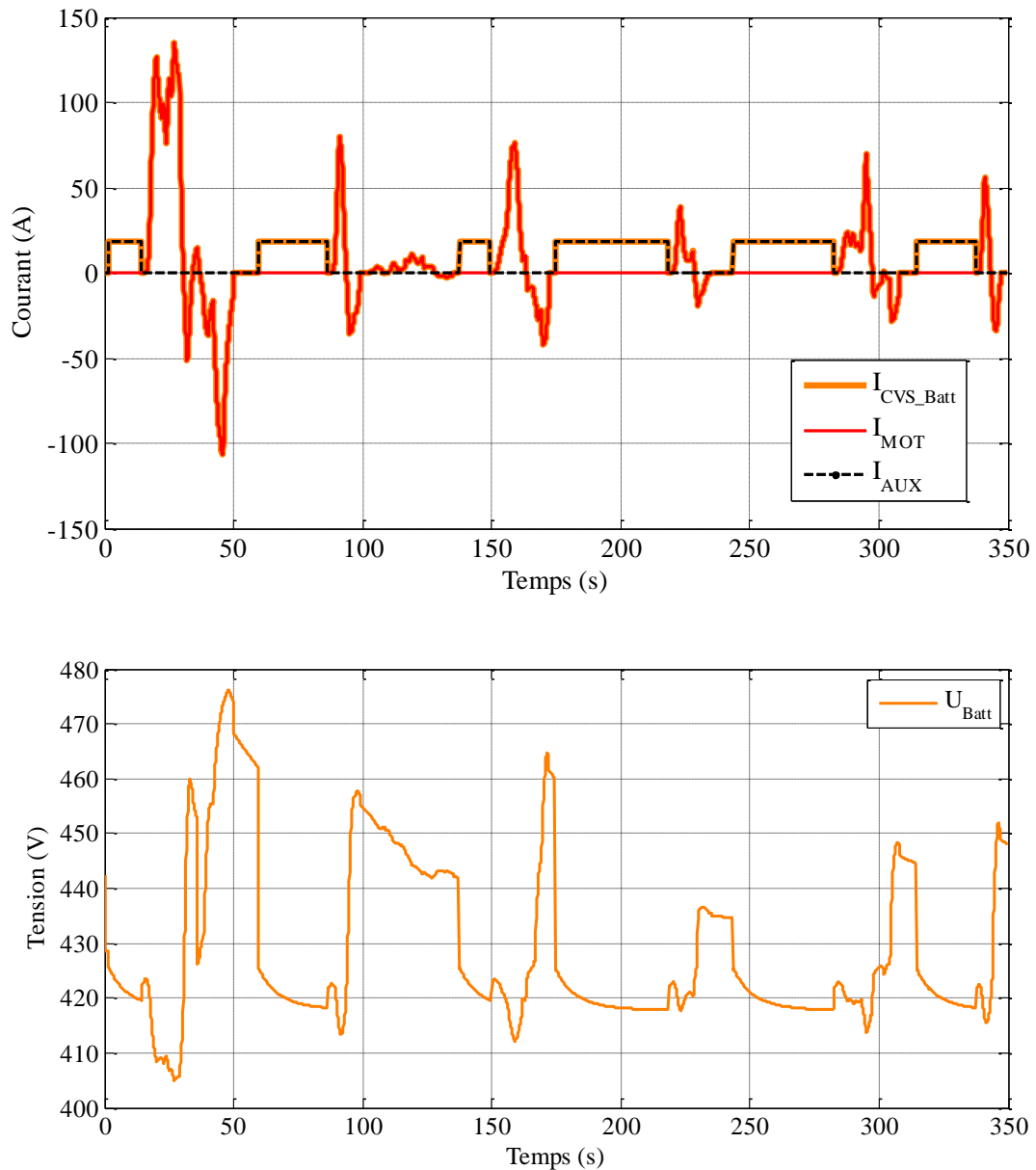


Figure 98 : Simulation de la BOM sur batterie seule – non-assistée ; hypothèses : modèle fin batterie, SoC 50%.

Notre stratégie de contrôle ne dépend pas de la tension estimée de la batterie, donc la dynamique du modèle fin ne change pas le résultat de la simulation. Mais la limitation du courant de recharge par le modèle fin a une influence capitale sur la consommation énergétique du véhicule. Pour illustrer ce constat nous avons illustré sur la Figure 99 l'énergie consommée pendant la phase de collecte par la BOM. A un SoC de 100%, l'écart d'énergie entre les deux modélisations est de 2.5MJ, soit 30% de la consommation finale ! L'écart d'énergie diminue au fur et à mesure que la batterie se vide, devenant négligeable vers un SoC de 75%.

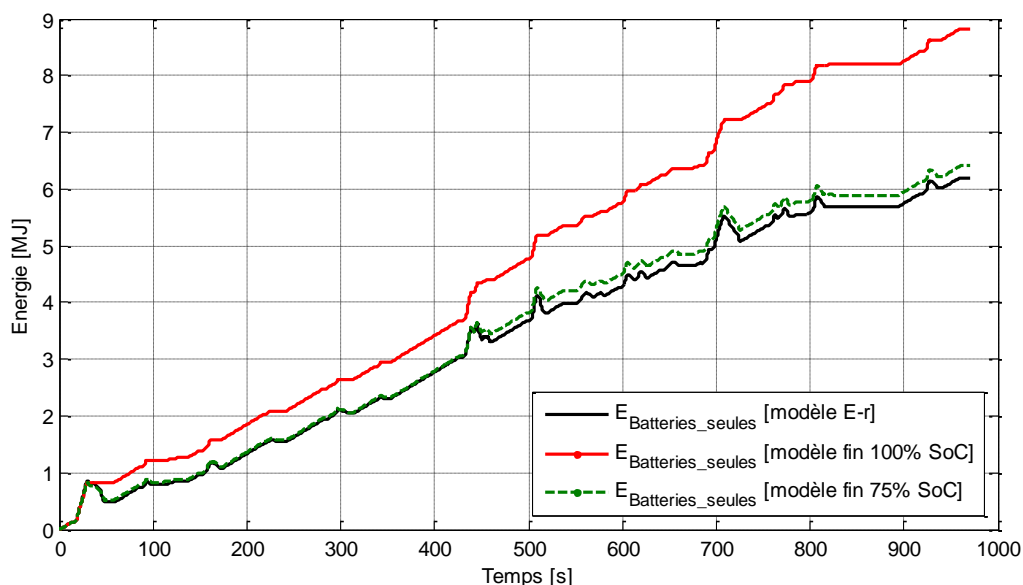


Figure 99 : Energie consommée pendant 1 cycle ARTEMIS pour les deux modèles

Si le modèle fin n'a pas d'influence sur le principe de la stratégie de gestion du flux de puissance entre supercondensateurs et batterie, il influe bien le fonctionnement lui-même. Nous donnons un aperçu des quelques différences sur les figures suivantes (Figure 100 et Figure 101) ou nous avons simulé la BOM alimentée par le stockage mixte et avec un courant de la batterie, sur le bus DC, limité à 25A. Les mêmes deux états de charge sont présentés (SoC=100% et SoC=75%) afin de pouvoir comparer facilement le comportement d'une batterie seule et d'une autre assistée par les supercondensateurs.

La Figure 100 et la Figure 101 pourraient paraître identiques, mais elles ne le sont pas. La seule petite différence se situe au niveau de la tension de la batterie, qui est différente pour les deux états de charge présentés (100% et 75%). Le reste des courbes sont effectivement identiques, car nous avons imposé par la stratégie de gestion de l'énergie à bord de limiter le courant dans la batterie à la bonne valeur, valeur corrélée avec un bon dimensionnement du pack de SC. De cette manière les SC récupèrent toute l'énergie issue du freinage électrique, la batterie n'est pas sollicitée en recharge et elle ne doit pas fournir des courants importants non plus.

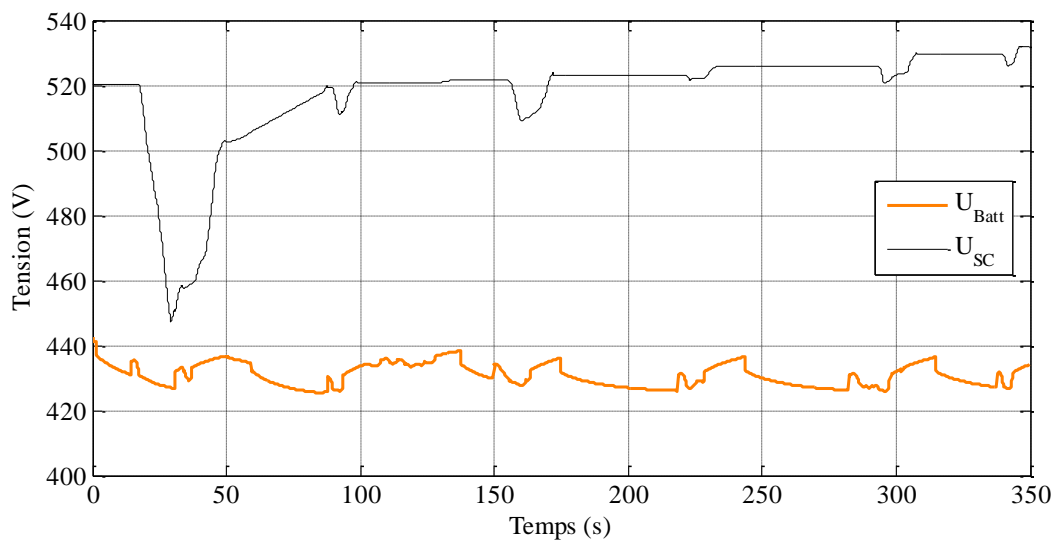
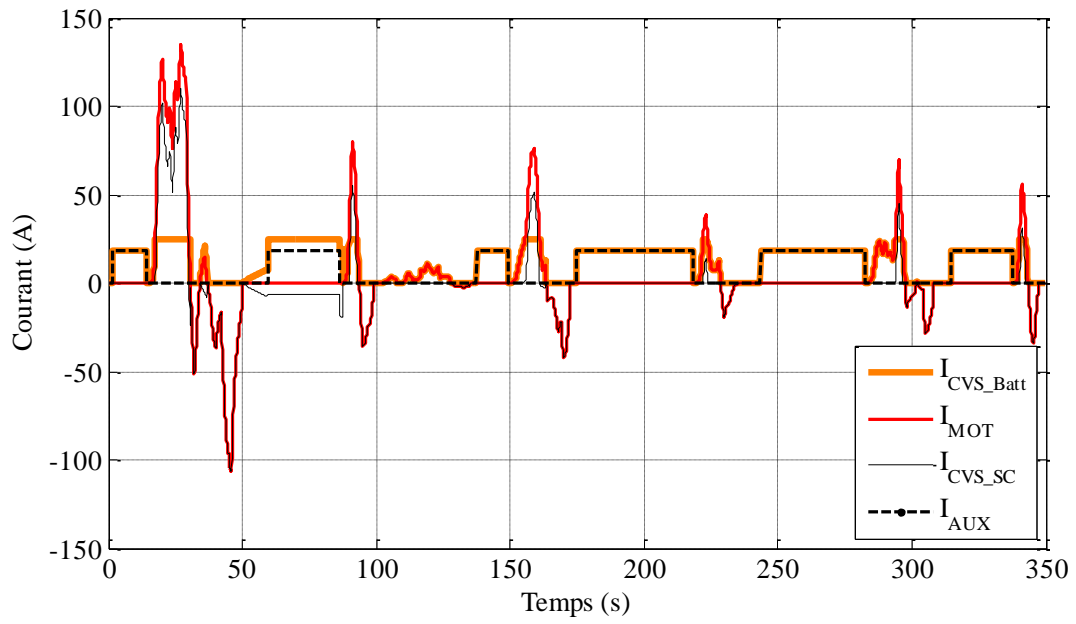


Figure 100 : Simulation de la BOM sur stockage mixte (modèle fin batterie, SoC 100%, 15F de SC, $I_{CVS_BATT_max} = 25A$).

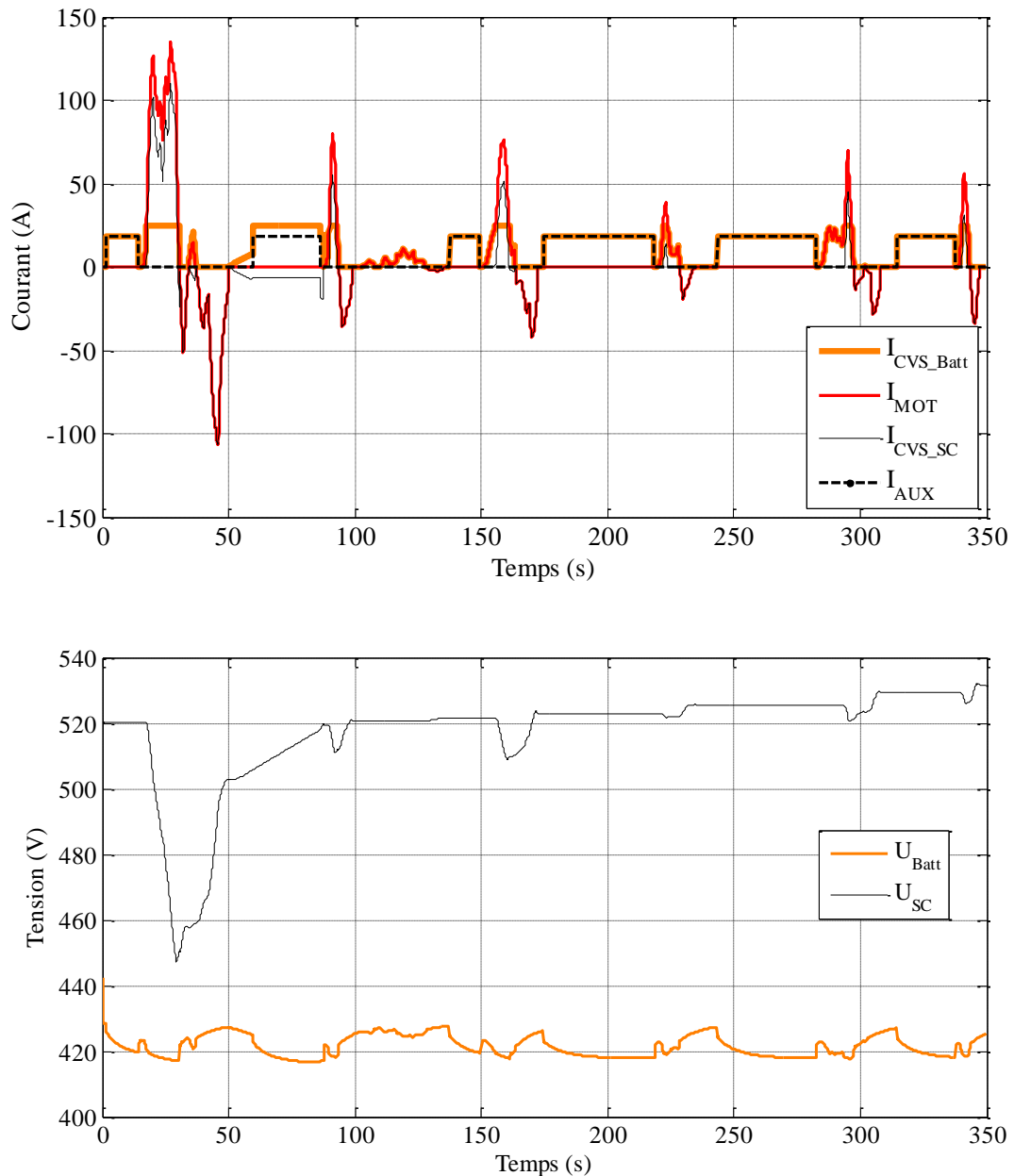


Figure 101 : Simulation de la BOM sur stockage mixte (modèle fin batterie, SoC 50%, 15F de SC, $I_{CVS-BATT-max} = 25A$).

Du point de vue de l'énergie consommée, le fait de ne pas solliciter en recharge la batterie fait que l'énergie estimée par les deux modèles, fin et E-r, est identique. Ce fait est illustré sur la Figure 102. Sur la même figure, nous constatons également que l'état de charge de la batterie n'influence plus l'énergie consommée sur le cycle. Cela s'explique par le fait que le pack de supercondensateurs est assez grand pour récupérer toute l'énergie fournie par le freinage électrique.

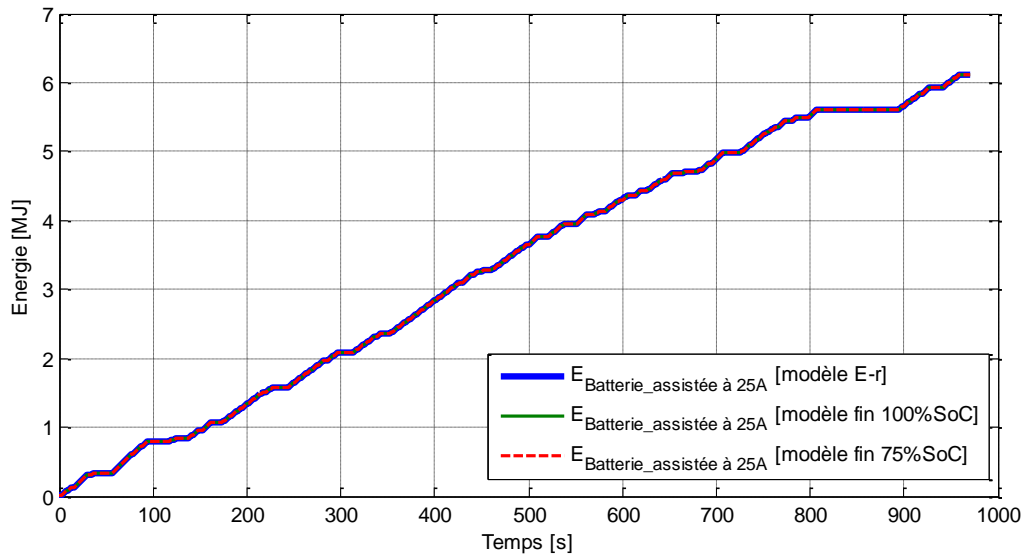


Figure 102 : Energie consommée pendant la phase de collecte d'un cycle ARTEMIS pour les deux modèles

4.2 Dimensionnement du stockage mixte

Afin de mieux mettre en évidence les différences entre le modèle E-r et le modèle fin, dans le paragraphe 4.1 nous avons simulé une BOM alimentée par une batterie seule. Nous avons juste effleuré notre cas spécifique, la BOM alimentée par le stockage mixte, circulant sur le cycle ARTEMIS (phase de collecte).

Pour analyser l'influence du profil de mission, de la taille du stockage mixte et de la stratégie de gestion des flux de puissance, nous avons simulé la BOM pour différentes capacités du stockage et pour différentes valeurs du courant maximal dans la batterie.

Nous avons constaté lors de cette analyse qu'il y a une très forte interaction entre le dimensionnement des supercondensateurs, celui de la batterie, le profil de mission et la loi de gestion d'énergie. De plus, chaque élément d'influence à ses propres paramètres ! Nous avons essayé malgré ces interactions fortes de partager ce paragraphe en deux parties : la première sera consacrée au dimensionnement des supercondensateurs et la seconde au dimensionnement de la batterie.

A la place d'une procédure, nous allons conclure par des considérations sur le dimensionnement.

4.2.1 Dimensionnement du pack supercondensateurs du stockage mixte

L'influence de la limitation du courant dans les batteries impacte sur la valeur du courant efficace circulant dans les batteries (Figure 103) et aussi sur celle des supercondensateurs (Figure 104) :

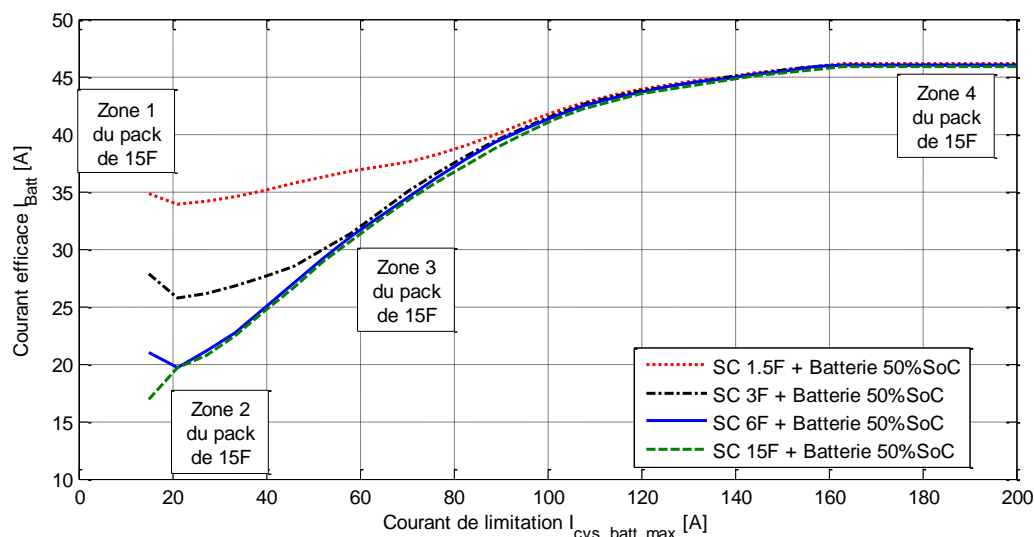


Figure 103 : Evolutions des courants efficaces de la batterie en fonction du courant limite de la batterie et des valeurs des supercondensateurs associés ajouter

Sur la figure ci-dessus, il apparaît des zones de fonctionnement que l'on peut identifier par trois critères qui sont :

- ✓ Pendant le cycle, existe-t-il un instant où les supercondensateurs sont totalement déchargés ? ($U_{sc} = 270V$)
- ✓ Pendant le cycle, existe-t-il un instant où les supercondensateurs sont totalement rechargés ? ($U_{sc} = 540V$)
- ✓ Pendant le cycle, les supercondensateurs sont-ils réellement utilisés ? (pendant tout le cycle, la tension des SC ne passe jamais en dessous de 520V)

Nous allons prendre par exemple le pack de 15F pour décrire les quatre zones de fonctionnement ainsi identifiées :

	Critère 1 : $\min(U_{sc}) = 270V$	Critère 2 : $\max(U_{sc}) = 540V$	Critère 3 : $\min(U_{sc}) > 520V$
Zone 1	✓	×	×
Zone 2	×	×	×
Zone 3	×	✓	×
Zone 4	×	✓	✓

Tableau 20 : Les 4 zones de fonctionnement des supercondensateurs

Dans la zone 1, la tension du pack SC atteint à un moment du cycle la tension minimale acceptable de 270V car les supercondensateurs sont trop sollicités. Comme ils se déchargent

totalemment, les batteries devront alors fournir, au moins une fois pendant le cycle, un courant supérieur au courant limite souhaité.

La zone 2 est la zone de fonctionnement optimale de l'algorithme, c'est une zone où la limitation en courant dans la batterie ne crée pas de décharges profondes ou de surcharges du pack de supercondensateurs. Le courant dans les batteries est alors toujours compris entre 0 et la valeur de courant maximal souhaité.

Dans la zone 3, le pack de SC atteint la tension maximale de 540V, les supercondensateurs n'étant pas assez sollicités, les batteries se rechargeront avec l'énergie de freinage électrique. Ce qui explique l'augmentation du courant efficace circulant dans la batterie

Dans la zone 4, le courant machine est entièrement fourni par la batterie. Lors d'une phase de freinage, les batteries doivent se recharger car les supercondensateurs sont déjà totalement chargés. Dans cette zone, les supercondensateurs sont totalement inutiles, le courant dans les batteries étant toujours égal au courant demandé par l'application.

Une remarque concernant la forme de la courbe de la Figure 103 : cette courbe est caractéristique de la stratégie de contrôle choisie. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons simulé un autobus sur le profil de mission de la ligne n°399 de la banlieue parisienne. Sans surprise nous avons retrouvé la forme de la courbe (avec les zones caractéristiques), mais évidemment avec des différences numériques. Cette simulation ne fait l'objet d'une présentation dans le présent mémoire.

La présence de ces zones de fonctionnement permet de tirer des conclusions sur le dimensionnement, la taille, du pack des SC. Le Tableau 21 répertorie six différents packs de supercondensateurs avec leurs zones de fonctionnement. Les packs constitués de 1,5F, 3F et 6F ne permettent pas d'obtenir un fonctionnement « optimal » souhaité de l'algorithme. Les trois derniers packs de supercondensateurs ont une zone de fonctionnement « optimal » plus ou moins étendue :

Pack de supercondensateurs	Zone 1	Zone 2 fonctionnement souhaité	Zone 3	Zone 4
1,5F	0 à 100A	×	100 à 155A	150 à 200A
3F	0 à 70A	×	70 à 150A	
6F	0 à 30A	×	30 à 150A	
10F	0 à 17A	17 à 28A	28 à 150A	
15F	0 à 13A	13 à 32A	32 à 150A	
25F	0 à 9A	9 à 36A	36 à 150A	

Tableau 21: Les quatre zones de fonctionnement en fonction du pack et du courant limite I_{BATmax}

Même si la capacité du pack de supercondensateurs est limitée par l'espace disponible, le Tableau 22 montre que même si le fonctionnement n'est pas « optimal » du point de vue de la loi de gestion, les packs de supercondensateurs permettent de réduire le courant efficace dans la batterie. Par exemple, le pack de 6F permet déjà de réduire le courant efficace de la batterie de 46A à 20A (pour un courant de la batterie limité à 20A, il existe quelques pics de courant de valeurs supérieures à 20A dus à la décharge totale des supercondensateurs). Le pack de 25F permet, quant à lui, de diviser par 4 la valeur efficace du courant.

Pack de supercondensateurs	Sans	1,5F	3F	6F	10F	15F	25F
Limitation du courant	160A	22 A	22 A	20 A	17 A	16 A	12,8 A
$I_{CVS_Batt_Max}$							
Valeur du courant efficace de la batterie	46A	34 A	26 A	20 A	17A	16A	11,7 A

Tableau 22 : Courant efficace dans la batterie en fonction des packs de SC et de la valeur du courant limite I_{Batt_Max}

Quant à l'influence du courant $I_{CVS_Batt_Max}$ sur les SC, nous constatons la présence de plusieurs zones sur la Figure 104.

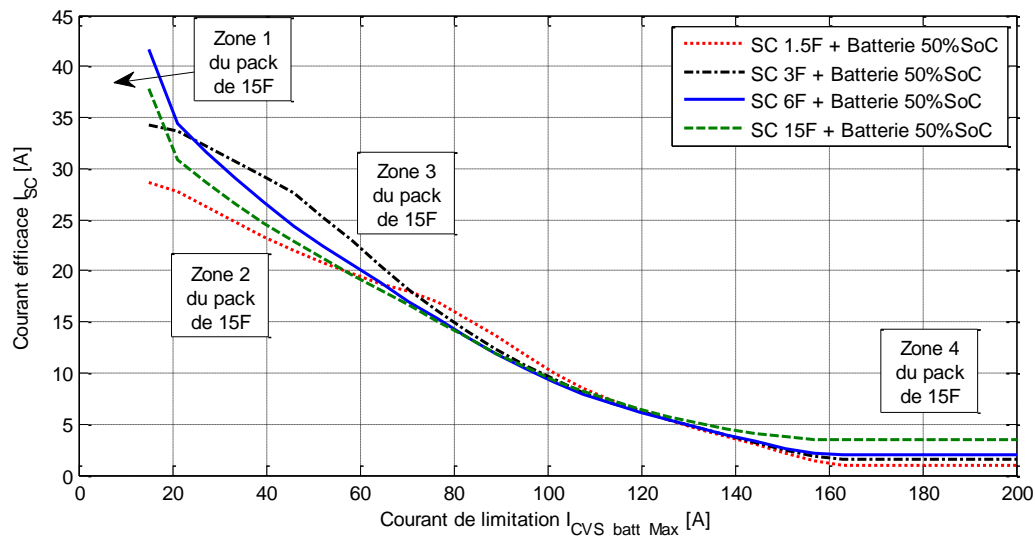


Figure 104 : Evolutions des courants efficaces des 4 packs SC en fonction du courant limite de la batterie

Du fait de la très forte limitation dans la zone 1, les supercondensateurs se déchargeant souvent complètement. La tension à leurs bornes étant faible, le courant dans les supercondensateurs augmente de façon très importante. La zone 2 est la zone de fonctionnement optimal de l'algorithme : les SC ont une tension moyenne assez élevée, ils ne sont jamais vidés ou remplis totalement. Dans la zone 3, le courant dans les supercondensateurs est faible car ce sont les batteries qui fournissent plus au bus. La zone 4, de courant efficace très faible, montre que les supercondensateurs sont très peu utilisés.

Nous nous sommes aussi posé la question de l'influence de la tension « de maintien »⁸ des supercondensateurs sur la consommation énergétique. Pour une analyse fine, nous aurions pu proposer un modèle de pertes du convertisseur statique de puissance qui interface les SC avec le bus continu. Mais nous avons préféré une autre approche.

⁸ Par cette tension de « maintien » nous comprendrons la tension autour de laquelle, le correcteur proportionnel régule la tension des SC afin de ne pas s'effondrer et de permettre le rechargement des SC à partir des batteries aussi, pas uniquement à partir du freinage récupératif.

La Figure 105 montre l'influence de la tension de maintien des supercondensateurs sur le courant efficace de la batterie. Nous remarquons que, par exemple, utilisant le pack de 10F, nous arrivons à atteindre un courant efficace de 19A dans la batterie uniquement si la tension de maintien est supérieure à 525V. Il faut donc une tension assez élevée pour le bon fonctionnement de l'algorithme. Les packs de SC inférieurs à 10F n'arrivent jamais au courant de 19A. Les points de « cassure » des courbes, identifié par un point bleu pour le pack de 15F, sont très importants car ils nous montrent clairement la tension de maintien limite à partir de laquelle le pack atteint de temps en temps le minimum de tension (pack de supercondensateurs totalement déchargé).

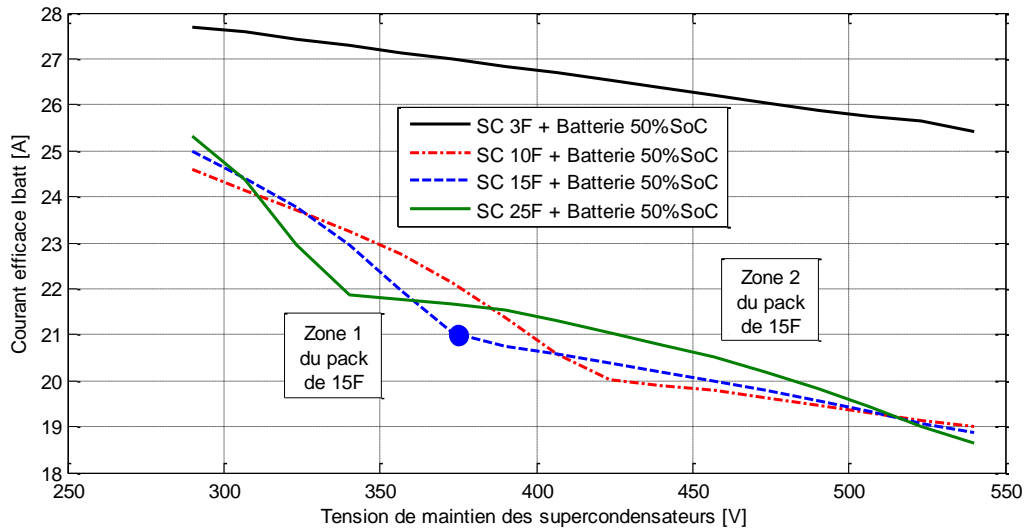


Figure 105 : L'influence de la tension de maintien des SC sur la valeur efficace du courant circulant dans la batterie

Nous avons vu que pour les batteries, la zone optimale de fonctionnement est la zone 2 (les batteries délivrent de l'énergie sans fournir de pics de puissance). Sur la Figure 106, nous voyons qu'il faut une tension de maintien importante pour réduire la valeur du courant efficace dans les supercondensateurs :

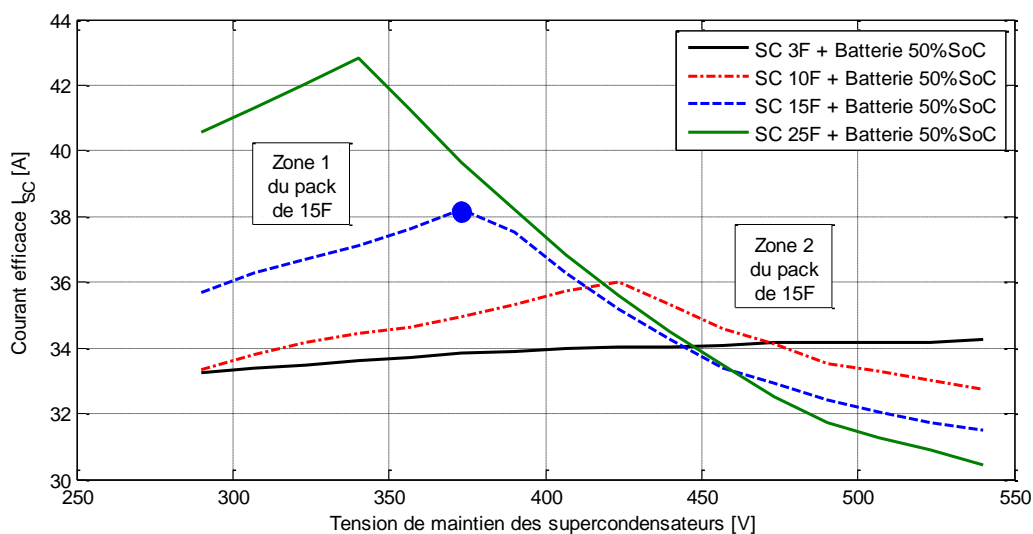


Figure 106 : L'influence de la tension de régulation des SC sur la valeur efficace du courant circulant dans les SC

Pour diminuer la valeur du courant efficace dans les supercondensateurs, il est plus avantageux de travailler à une tension élevée au niveau des supercondensateurs que d'augmenter la capacité du pack de supercondensateurs.

En guise de conclusion à cette analyse, nous constatons que le pack de supercondensateurs peut être dimensionné pour assister totalement la batterie ou alors pour seulement réduire ses contraintes en courant.

Dans le cas de la réduction des contraintes en courant, un petit pack de supercondensateurs (par exemple 3F-540V) permet déjà de réduire considérablement la valeur du courant efficace de la batterie (division du courant par 2 dans notre cas). La majorité du courant de freinage électrique sert à recharger les supercondensateurs et l'autre partie est soit utilisée pour la recharge de la batterie, soit elle est perdue du fait de la limitation du courant de charge de la batterie lorsqu'elle est quasiment pleine. Cette solution est la moins onéreuse du point de vue des packs de supercondensateurs.

Dans le cas où le pack de supercondensateurs est dimensionné à travailler dans une zone optimale, les supercondensateurs permettent alors de minimiser la valeur du courant efficace circulant dans la batterie et diminuer la consommation d'énergie. Le pack de batterie fournit alors un courant toujours compris entre 0A et une valeur maximale fixée. Cette méthode de dimensionnement du pack de supercondensateurs est la plus efficace dans le cas d'une batterie énergétique - batterie qui a son maximum d'efficacité lorsqu'elle fournit un faible courant pendant une longue période - ou alors dans le cas d'une batterie qui a une forte limitation du courant de recharge.

Le courant maximal de la batterie (donnée imposée par la stratégie de gestion du flux de puissance entre SC et batterie) est un paramètre qui influe d'une manière très importante la valeur efficace du courant dans la batterie et les supercondensateurs, et son choix est indissociable de la connaissance de la batterie utilisée et du choix de la taille du pack de supercondensateurs.

4.2.2 Dimensionnement de la batterie du stockage mixte

Un élément essentiel qui influe sur le dimensionnement du stockage mixte est la capacité d'une batterie à stocker l'énergie en fonction de son état de charge. Dans le cas d'une batterie au plomb, il y a une telle limitation du courant en charge que l'assistance totale des supercondensateurs est fortement conseillée. Une faible assistance est caractérisée soit par une faible limitation de courant dans la batterie, soit par un petit pack de supercondensateurs. Pour mettre en évidence ces deux possibilités, nous montrons sur la Figure 107, l'énergie fournie par une batterie pleine pour différents packs de supercondensateurs (de 1,5F à 25F) et différents niveaux de limitation du courant.

Deux remarques importantes sont à faire. D'abord, en terme d'énergie consommée à la batterie, la valeur du pack SC a peu d'influence pour un courant maximum de batterie donnée. Par contre, la valeur du courant maximum dans la batterie a une très grande influence sur la consommation : 6MJ pour une forte limitation à comparer au 9 MJ pour une faible limitation.

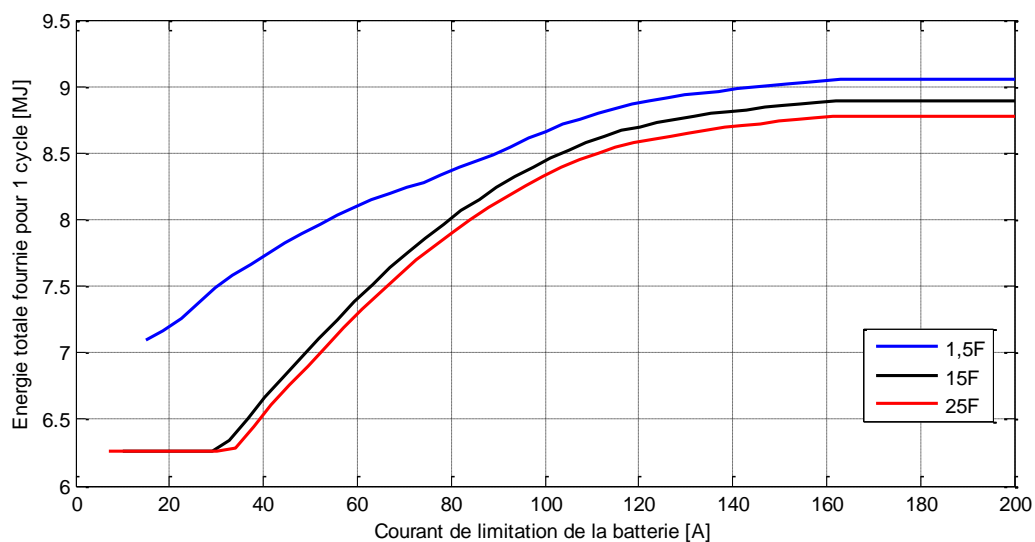


Figure 107 : Energie fournie par la batterie pour un cycle de 20 min

La forte limitation en courant de charge d'une batterie au plomb influence également l'énergie récupérée et dissipée par les freins mécaniques. Sur la Figure 108, nous pouvons observer le couple de freinage mécanique pour deux états de charge donnés : si la batterie est pleine, la puissance de freinage (couple) est deux fois plus grande que dans le cas d'une batterie à moitié chargée. Au regard d'une journée entière, l'énergie dissipée dans les freins mécaniques est illustrée Figure 109 pour 2 packs de supercondensateurs différents (1,5F et 15F). Pour obtenir les courbes de la Figure 109, nous avons imposé un état de charge initial de la batterie à 100%. L'état de charge finale est d'environ 55%.

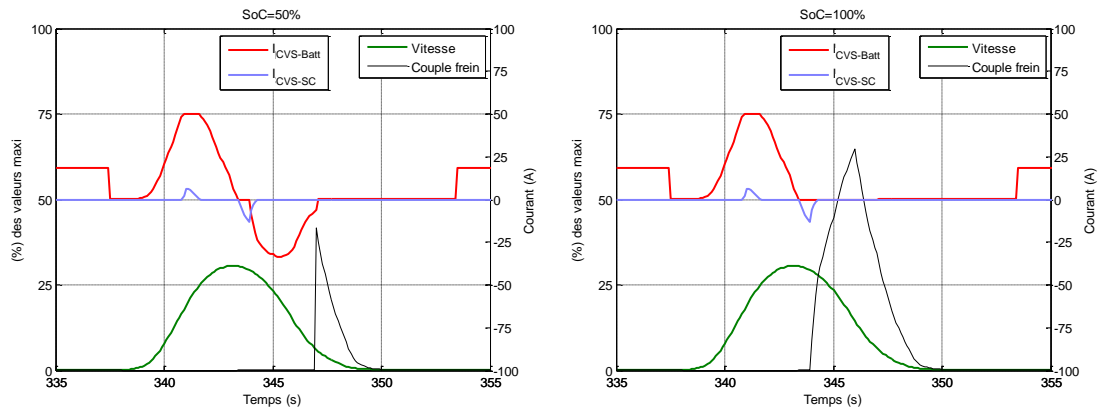


Figure 108 : Conjugaison freins mécaniques et freinage électrique, pour différents SoC de la batterie

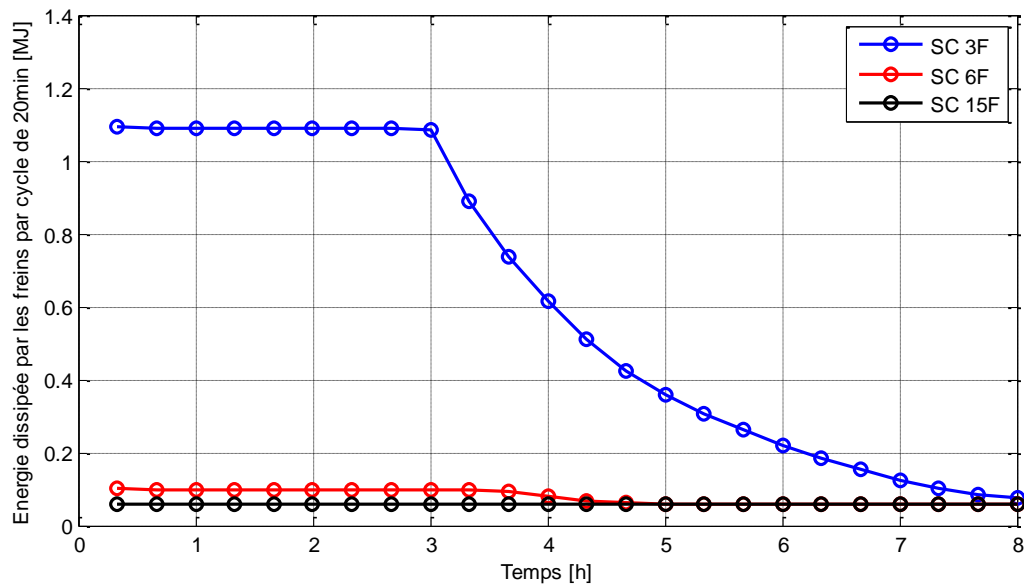


Figure 109 : Energie dissipée par les freins mécaniques

La limitation du courant de recharge de la batterie a une très forte influence sur la consommation en énergie du véhicule sur une journée entière. Sur la Figure 110 nous présentons cette consommation et le scénario joué : la comparaison d'une BOM alimentée par la batterie seule et une BOM alimentée par un stockage mixte. L'état de charge initiale de chaque batterie est supposé à un SoC de 100%.

L'écart dans la consommation est très grand (+30% par cycle) en début de journée, lorsque la batterie est totalement chargée en début de journée, car elle n'accepte aucun courant de recharge. Après environ 2h30' la batterie atteint un état de charge d'environ 85% et elle commence à accepter des courants de recharge. A la fin de la journée, lorsque la batterie est à un état de charge d'environ 50%, elle accepte la totalité du courant provenant du freinage électrique. Moyennant sur une journée, l'énergie perdue par la BOM alimentée par la batterie seule est d'environ 17% (151MJ par rapport à 182MJ) ! Toute cette énergie perdue part dans les freins mécaniques. Si en début de journée le freinage est 100% électrique pour la version du pack assistée (les supercondensateurs

stockent l'énergie), il est 100% mécanique pour le pack non-assisté. A la fin de la journée, le freinage est 100% électrique pour les deux types de packs.

En terme de capacité en Ah nécessaire au fonctionnement journalier décrit précédemment, cette différence de fonctionnement entraîne alors une surcapacité de 19,8% (76.7Ah par rapport à 94.4Ah) de la BOM alimentée par batterie seule par rapport à celle alimentée par un stockage mixte.

Un autre désavantage d'utilisation d'une batterie seule vient du fait que la batterie doit fournir de fortes demandes en courant (jusqu'à 150A) et doit subir des micro-cycles de charge-décharge lors des phases de freinage/accélération du véhicule.

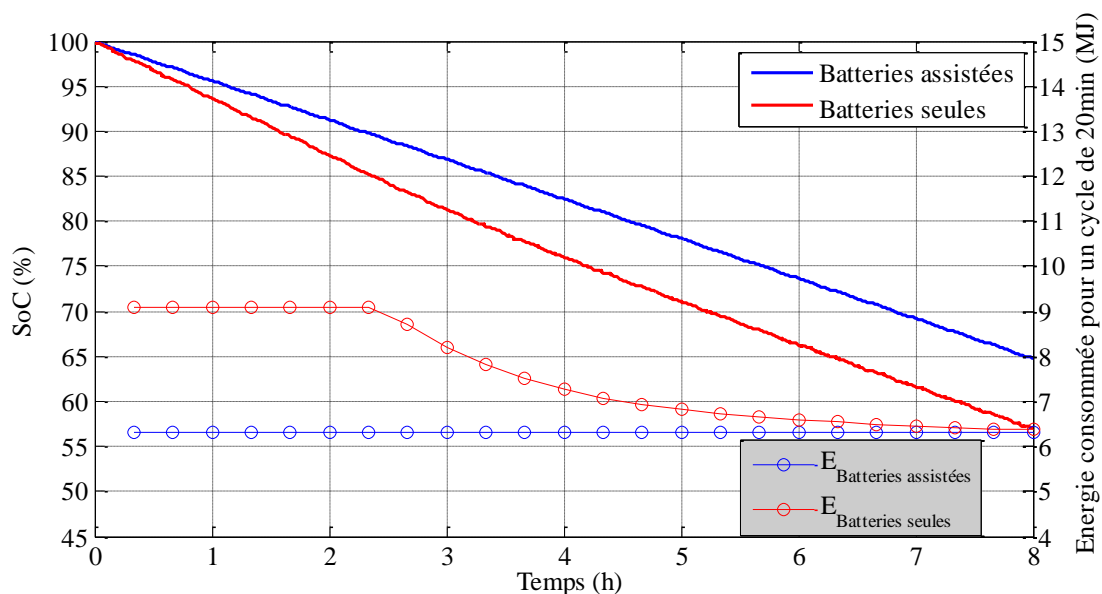


Figure 110 : Comparatif entre un pack de batteries assistées et un pack de batteries seules (1 branche donc ½ pack)

Mais ces résultats sont différents dans un autre scénario. Imaginons la même comparaison des bennes mais que l'état de charge initial des batteries est de 80%. La fenêtre d'utilisation des batteries sera alors de 80% SoC à 30% SoC. La surconsommation sera alors beaucoup moindre, de 4.5% (151MJ par rapport à 158MJ). La surcapacité nécessaire diminuera elle aussi à 6.5% (78.2Ah par rapport à 83.6Ah) ! L'inconvénient d'une telle solution de décalage de la fenêtre de SoC est l'état de charge minimale, qui n'est pas recommandable par le constructeur pour des raisons de durée de vie.

Dans le cas d'utilisation du stockage mixte, l'état de charge initiale n'influe pas sur la consommation d'énergie. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

	Batterie seule		Batterie assistée	
Charge initiale	80%	100%	80%	100%
Energie [MJ]	158	182	151	151
Capacité [Ah]	83,6	94,4	78,2	76,7

Tableau 23 : Récapitulatif des énergies consommées pendant un cycle journalier

Les considérations précédentes sur la surconsommation d'énergie et la surcapacité à installer sur une BOM alimentée à partir d'une batterie seule sont à la base du dimensionnement de la batterie du stockage mixte. En effet, nous pouvons modifier la batterie obtenue par la procédure de prédimensionnement décrite dans le chapitre 2.3.3 dans le sens de la diminution de la capacité à embarquer de 17%. Les deux manières de réduction de cette capacité sont résumées dans le tableau suivant, à la dernière ligne :

Modèle	Alimentation BOM	Configuration stockage	Masse
Modèle E-r	batterie seule (pour 10h de fonctionnement)	2 x 44 batteries 12V / C ₁₀ =110Ah	3,5t
	batterie seule (pour 8h de fonctionnement)	2 x 34 batteries 12V / C ₁₀ =110Ah	2,7t
	<i>stockage mixte – issue de la procédure de prédimensionnement (pour 8h de fonctionnement)</i>	2 x 34 batteries 12V / C ₁₀ =110Ah	2,7t + 200kg SC (CVS inclus)
Modèle fin	batterie seule (pour 8h de fonctionnement)	2 x 41 batteries 12V / C ₁₀ =110Ah	3,3t
	<i>stockage mixte (pour 8h de fonctionnement)</i>	2 x 32 batteries 12V / C ₁₀ =110Ah	2,5t + 200kg SC (CVS inclus)
		2 x 41 batteries 12V / C ₁₀ =80Ah	2,8t (si 35kg/batterie) + 200kg SC (CVS inclus)

Tableau 24 : Récapitulatif des différents prédimensionnements

Les deux possibilités de diminution de la capacité de la batterie jouent sur le nombre des batteries et la capacité de chaque batterie :

- Soit en gardant le même type de batteries mais en réduisant leur nombre, ce qui se traduit par une augmentation du courant circulant dans les batteries (d'environ 20% car la réduction du nombre de batteries entraîne une diminution de la tension de la batterie),
- Soit en gardant le même nombre de batterie mais en choisissant des batteries de capacité moindre et plus légères. Cette solution ne peut être envisagée dans notre cas, car dans la gamme Enersys, cette batterie n'existe pas.

4.3 Influence de l'hybridation des batteries au plomb sur leur durée de vie

Parmi les avantages, cités dans le paragraphe précédent, d'une alimentation par stockage mixte, nous avons voulu tester celui de l'influence sur la durée de vie. Dans le domaine de l'analyse de la durée de vie, les différentes études ou articles scientifiques « pêchent » par la méconnaissance du lien entre le profil de courant et la durée de vie. Afin de quantifier l'apport des SC en termes de rallongement de la durée de vie du pack batterie, nous avons imaginé l'expérience suivante : comparer un pack batterie soumis au profil de courant issu du cycle journalier d'une BOM alimentée par un pack de batteries seules avec le même pack batterie soumis à un profil de courant issu du cycle journalier de la BOM alimentée par un stockage mixte. Le stockage mixte est constitué de la même batterie mais assistée par des supercondensateurs.

4.3.1 Présentation du banc d'essais et de la procédure de test

Le banc d'essais est à l'échelle $\frac{1}{2}$ en courant et $\frac{1}{4}$ en tension par rapport au pack de la BOM alimentée par batterie seule. Une photo du banc est illustrée sur la figure suivante :

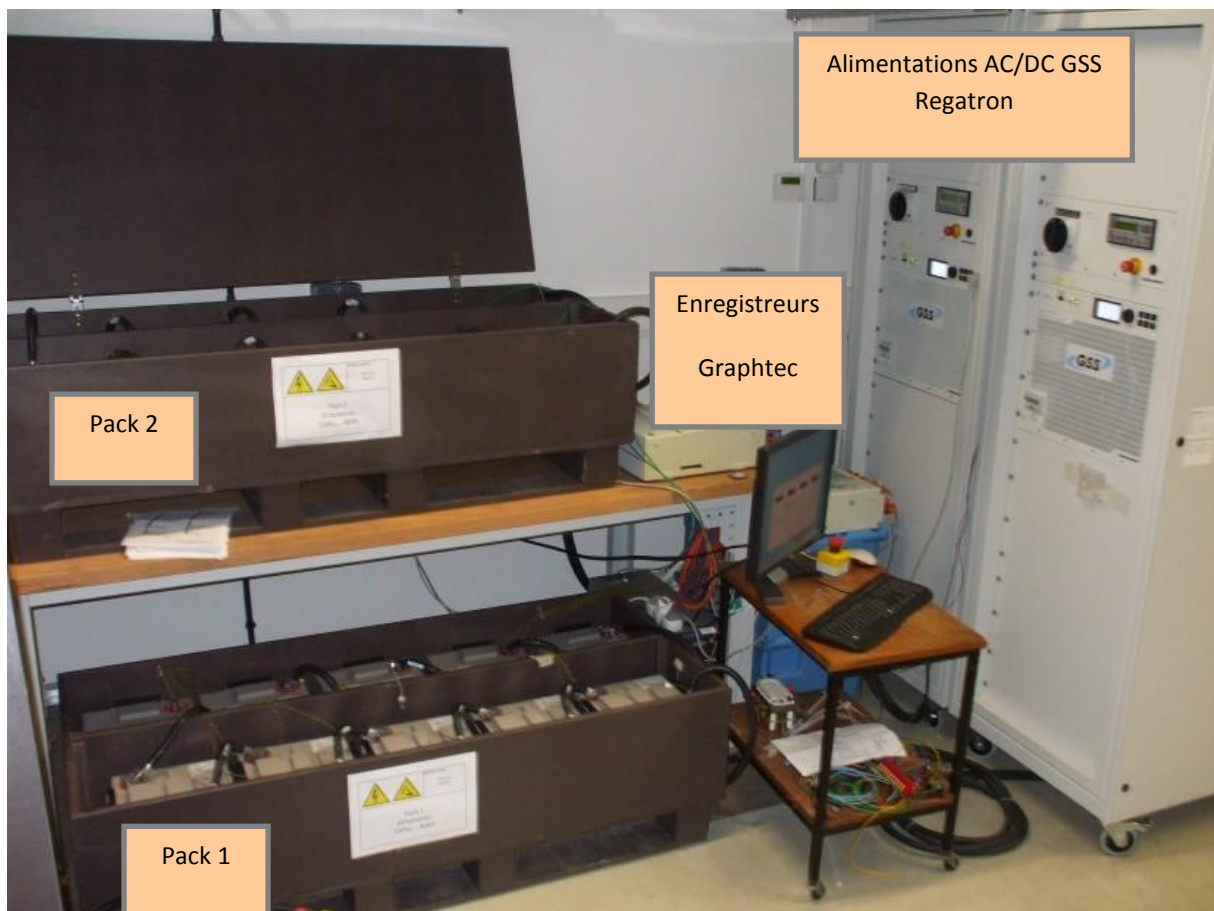


Figure 111 Banc de cyclage batteries

Le **pack 1** est soumis au profil de courant appelé BATT+SC (illustré sur la Figure 112), et le **pack 2** aux profils de courant appelés BATT100 & BATT50 (illustrés sur la Figure 113). Le profil de courant BATT+SC est issu de la simulation de la BOM alimentée par le stockage mixte (2x34 batteries, 200 SC de 3000F en série) avec un écrêtage du courant à 50A (sur le bus DC, ce qui augmente légèrement cette valeur du côté des batteries). Les profils BATT100 & BATT50 sont issus de la simulation de la BOM alimentée uniquement par le pack de 2x34 batteries – pour une état de charge de 100% et 50% respectivement. Le **pack 1** est constitué de 9 batteries (sans la UK97) et le **pack 2** de toutes ces 10 batteries.

Certaines limitations du banc ont conduit à quelques modifications des profils de courant réellement suivis par rapport aux profils issus de la simulation :

- Les pointes de courant supérieures à $\pm 66A$ ont été écrêtées car le convertisseur GSS de chez Regatron ne peut pas délivrer un courant supérieur,
- Le profil BATT+SC (Figure 112) est répété 24 fois pour simuler une mission journalière mais sans pause entre les cycles afin de gagner du temps de cyclage (Figure 114). Ce profil est valable en début de journée quand il n’y a pas de récupération d’énergie possible (SoC supposé 100%), mais pas en fin de journée. Néanmoins, pour faciliter le suivi et pour des raisons de limite de stockage d’un profil sur les convertisseurs GSS il a été généralisé à toute la journée.
- Le **pack 2** est soumis au profil BATT100 (répété 12 fois) et au profil BATT50 (répété 12 fois également) afin de simuler le fonctionnement d’un pack qui travaille dans la fenêtre 100%SoC \leftrightarrow 50%SoC (Figure 115),
- Pour mémoriser le profil de courant sur le convertisseur GSS nous disposons de 1024 points, ce qui nous oblige à fournir un profil de mission échantillonné à 1Hz.
-

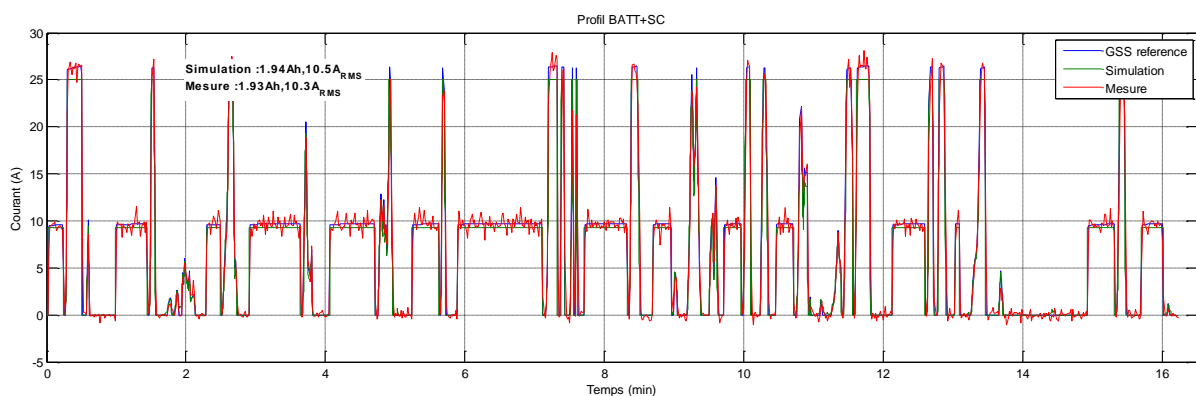


Figure 112 Profil BATT+SC pour simuler la BOM alimentée par le stockage mixte

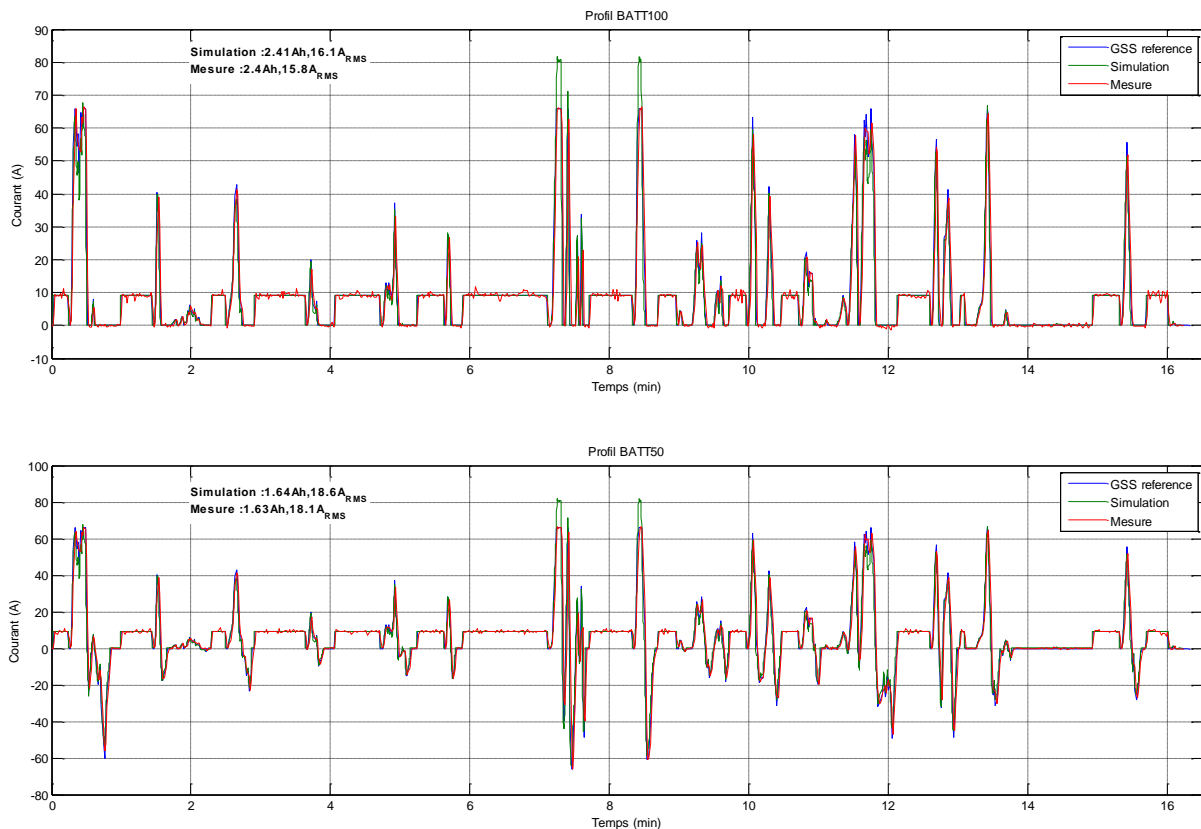


Figure 113 Profils BATT100 & BATT50 pour simuler la BOM alimentée par une batterie uniquement

Une autre modification, viens d'une petite erreur. Nous avons imposé au **pack 2** un profil correspondant au courant côté bus DC, I_{CVS_Batt} au lieu du courant côté batterie, I_{Batt} . Cela se traduit par un courant efficace moins important dans le pack, ainsi que des microcycles plus faibles. Cela joue dans le sens de l'augmentation de la durée de vie des batteries. Néanmoins, cette erreur n'a pas d'impact considérable, car la différence est très faible : moins de 1% sur les Ah et le courant efficace.

Comme nous l'avons fait remarquer précédemment, les profils BATT100 et BATT50 sont répétés 12 fois chacun pendant une journée. En réalité, le profil de courant devrait changer après chaque cycle, car l'état de charge de la batterie change et l'acceptabilité en courant se modifie. Mais cela impliquerait 24 profils différents par jour. Or notre convertisseur Regatron n'est pas capable de mémoriser plus d'un profil de courant. Il fallait donc soit rester à côté du banc de test en permanence ou changer la manière de cyclage. Nous avons bien évidemment adopté pour la deuxième variante. En conséquence nous avons apporté une modification supplémentaire (qui nous éloigne des conditions idéales du cyclage, mais qui garde l'objectif) : nous avons « moyenné » le comportement du pack batterie sur la durée d'une journée. Autrement dit, sur les 8heures de cyclage journalier, la répétition du profil BATT100 représente le comportement de la batterie pour des états de charges comprises entre 100% et 85%SoC. La répétition 12 fois du profil BATT50 représente le comportement de la batterie pour des états de charge entre 85% et 50% SoC.

L'enchaînement des profils BATT50, BATT100 et BATT+SC, suivies de la charge, est illustré sur les figures suivantes :

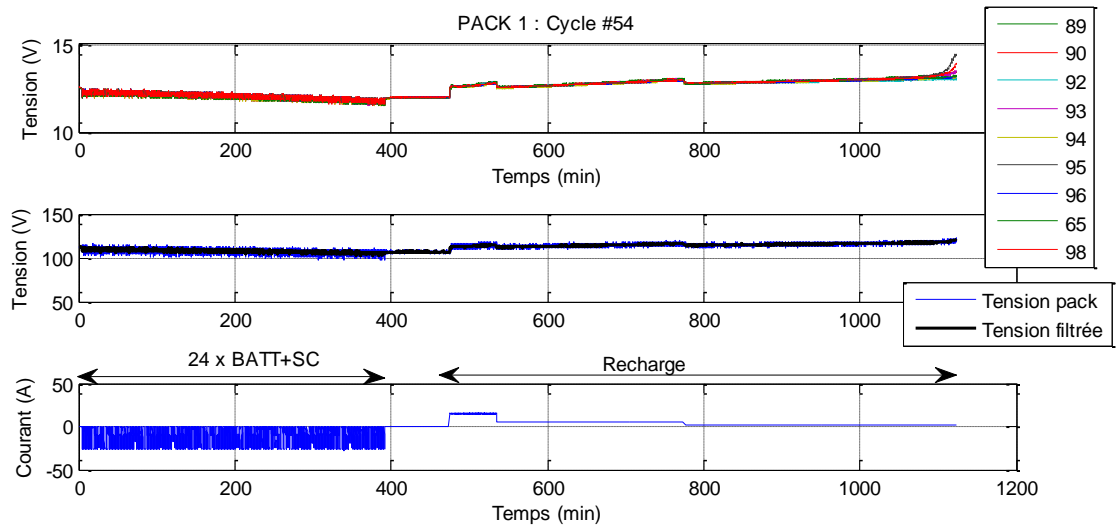


Figure 114 24 enchaînements du profil BATT+SC suivies de la recharge du pack 1

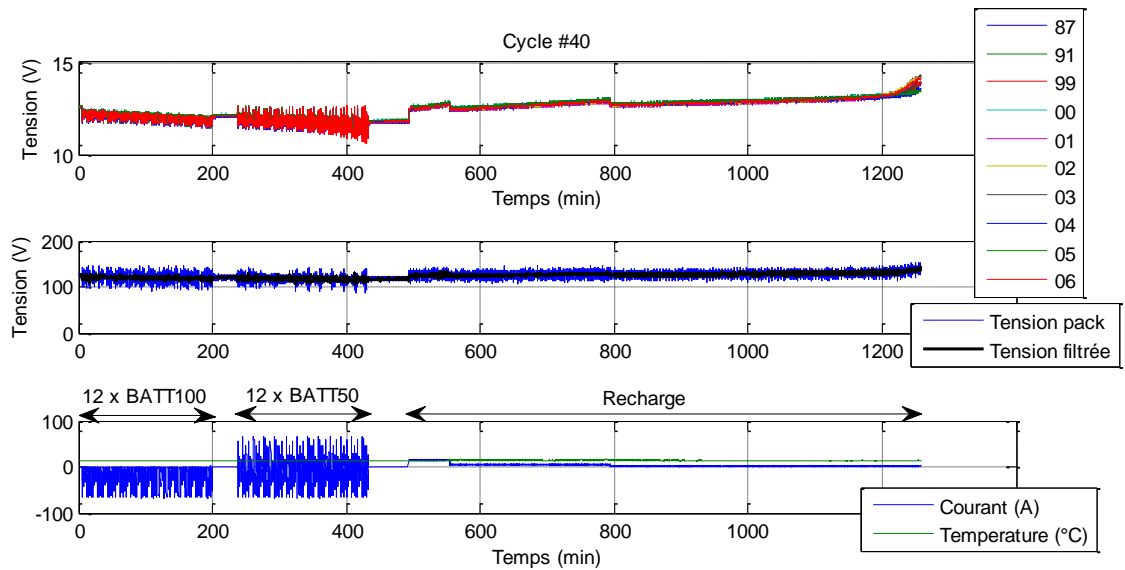


Figure 115 Enchaînement de 12 cycles BATT100, 12 cycles BATT50 et la recharge du pack 2

Les prévisions théoriques de cyclage des batteries dans la fenêtre de 100% ↔ 50%SoC ont été invalidées. Malheureusement, comme il n’y a pas de système de recharge individuelle (ou d’équilibrage) des batteries, la valeur la plus grande de l’état de charge (la moyenne d’un pack batterie) que nous avons pu atteindre, après une recharge à courant constant, est d’environ 70%. Par conséquent, nous avons du cycler les batteries dans la fenêtre de 70% ↔ 20%SoC. La recharge à courant constant a été notre seule option possible, malgré le fait que le GSS est capable d’imposer une recharge à tension constante aussi, car la dispersion des paramètres (capacités et ESR) entre les différentes batteries du pack fait que la tension d’une batterie pouvait atteindre son maximum (14.3V) avant que la tension du pack atteigne le sien (143V) :

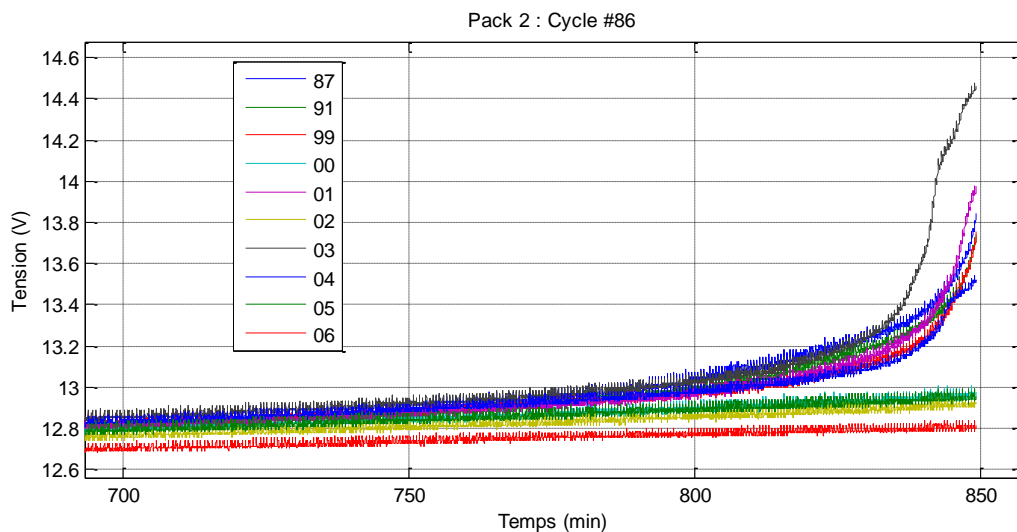


Figure 116 : zoom sur une fin de la recharge

L’état de charge moyenne ainsi que la dispersion des SoC à l’intérieur de chaque pack sont illustrés sur la Figure 117. L’état de charge en début de journée est estimé à partir de la tension à vide des batteries, au repos depuis au minimum 2 heures. Nous constatons que le SoC initial des packs est d’environ 70% pour le **pack 1** et 65% pour le **pack 2** tout au long du cyclage. Malgré ce constat, nous avons maintenu les mêmes profils de décharge et de charge des deux packs.

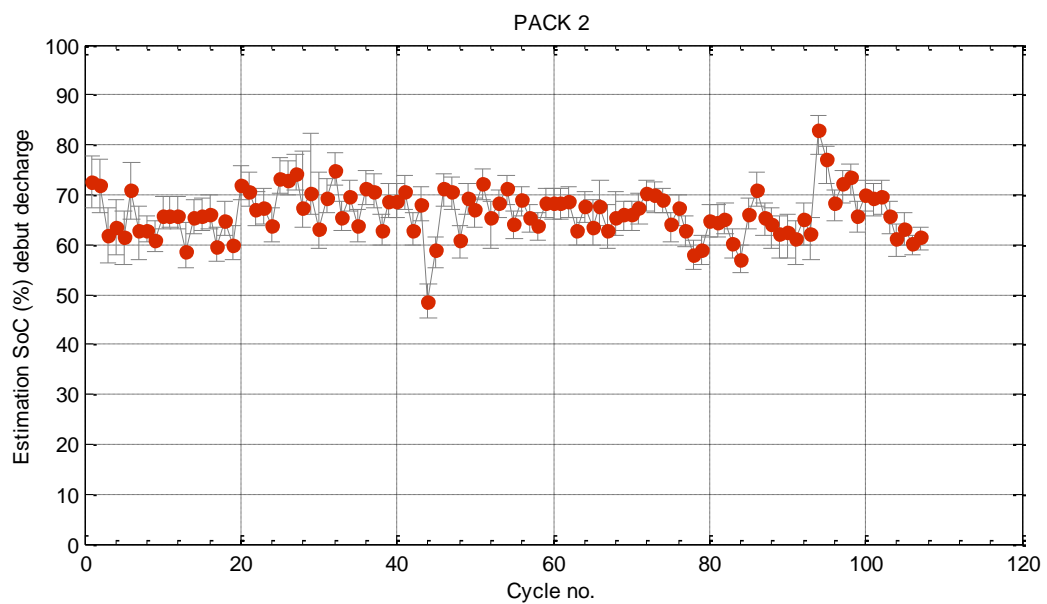
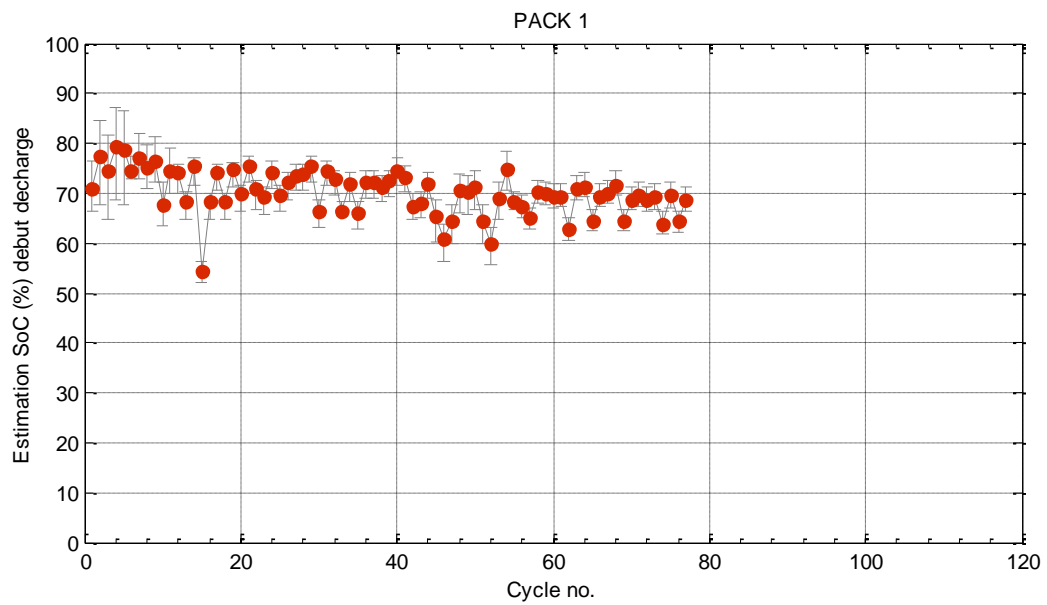


Figure 117 : Evolution de l'état de charge initial en début de journée : valeur moyenne d'un pack (en rouge) et les valeurs extrêmes

Le fait de travailler dans la fenêtre 70%SoC ↔ 20%SoC (Figure 118) n'est pas très recommandé par le constructeur, à cause du vieillissement des batteries. Mais pour notre comparaison cela va dans le bon sens, de raccourcissement du nombre des cycles à effectuer, donc de diminution de la durée de vie du pack. Il s'agit d'ailleurs du seul moyen d'accélération du vieillissement raisonnablement envisageable.

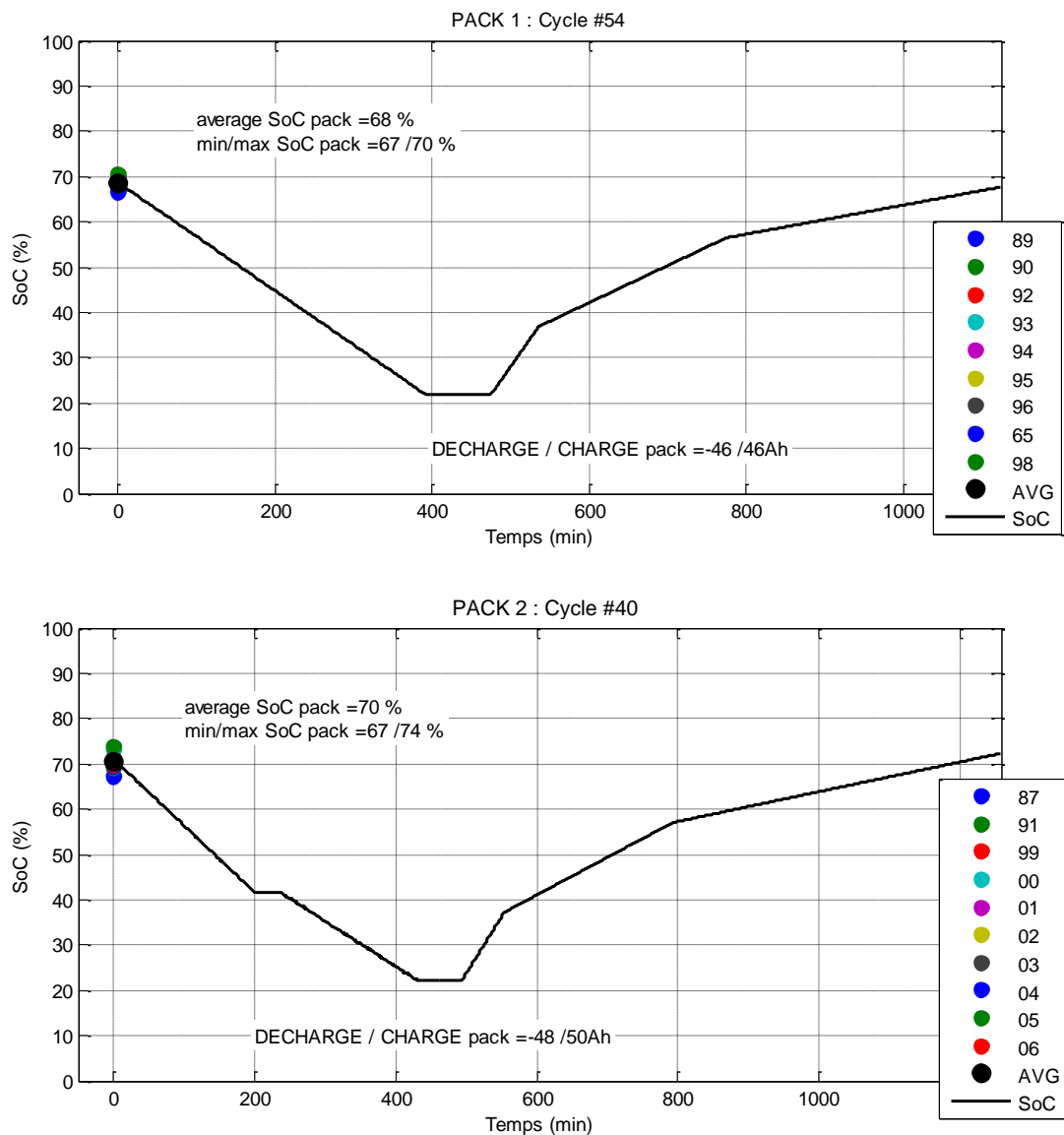


Figure 118 Evolution de l'état de charge lors d'un cycle journalier + recharge des packs ; dispersion des SoC des pack

D'autres moyens d'accélération du vieillissement sont l'augmentation de la température des packs (au delà de 25-30°C), mais cela implique une logistique dont nous ne disposons pas, ou la répétition de la séquence la plus contraignante du cycle. Nous avons montré dans [Vulturescu, 2010] que ce dernier moyen n'était pas efficace dans notre cas à cause du fait que la valeur du courant efficace des batteries est assez constante (à cause des auxiliaires) et donc il n'y a pas de séquence plus contraignante qu'une autre.

D'après les profils de référence (théoriques), l'énergie fournie par le **pack 1** durant les 24 cycles (environ 6heures et 30min) est de 46.3Ah et l'énergie fournie par le **pack 2** est de 48.4Ah (28.8Ah+19.6Ah). La mesure, Figure 118, confirme les valeurs théoriques.

La recharge des packs s'effectue après la décharge (enchaînement des profils 24 x BATT+SC et 12 x BATT100 & 12 x BATT50) et elle dure environ 10heures. Malheureusement, nous avons changé plusieurs fois en cours de route le profil du courant de recharge, afin de mieux recharger les batteries.

Au début du cyclage, le **pack 2** a été soumis à une recharge à courant constant de 5A pendant les 20 premiers cycles charge-décharge. Des problèmes de régulation au niveau des convertisseurs Regatron nous ont empêchés d'atteindre un courant plus faible. Une fois le problème résolu, après le 20ème cycle, le profil de recharge (illustré sur la Figure 119) du **pack 2** a été le même jusqu'au 64ème cycle : charge d'une heure à 15A, suivie d'une charge de 4heures à 5A et d'une charge illimitée temporellement à 2A. La charge finale est arrêtée par le dispositif de surveillance des tensions individuelles. Après le 64ème cycle la capacité de la batterie a diminué et la durée du palier à 2A a diminué drastiquement. La conséquence a été une moindre charge du pack. Après le cycle 64, afin de revenir à une recharge plus importante, nous avons raccourci (de 4heures à 2.5heures) la durée de la recharge à 5A. La conséquence a été la « réapparition » du palier à 2A et une meilleure charge des batteries.

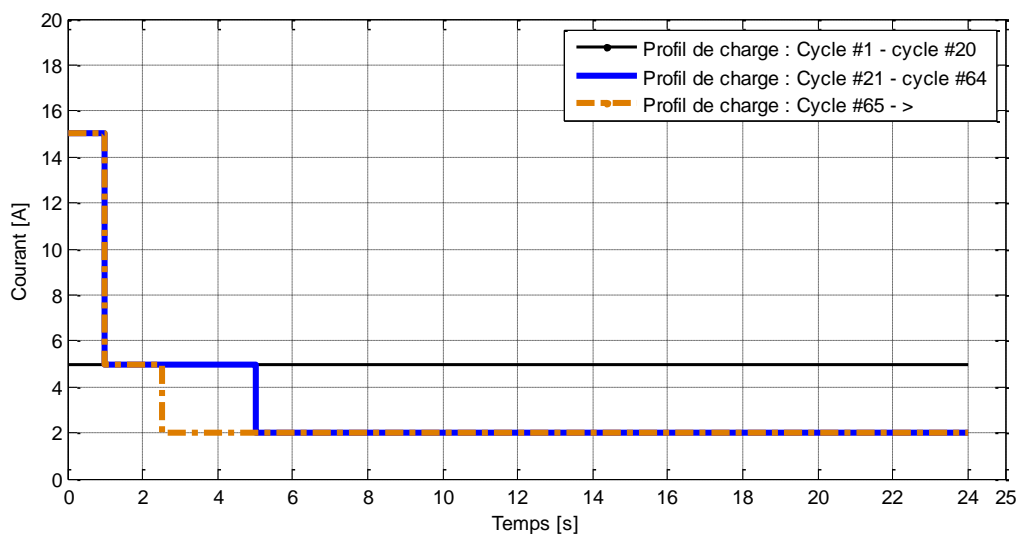


Figure 119 Profils de recharge du pack 2

La recharge du **pack 1** a souffert moins de modifications, car il a été mis en cyclage après le **pack 2** – voir une chronologie sur la figure suivante :

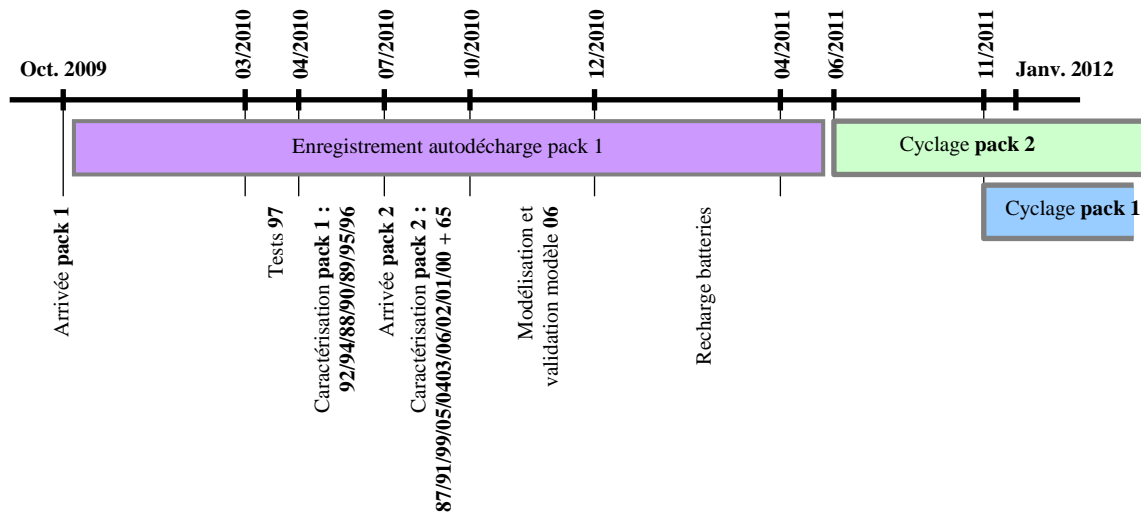


Figure 120 : La vie des batteries Enersys à l'IFSTTAR

Du début du cyclage et jusqu'au cycle 32, le **pack 1** a suivi une recharge en courant semblable à celle du **pack 2** : ½heure à 15A, ensuite 4½heures à 5A et une durée illimitée à 2A. Afin de conduire les essais dans les mêmes conditions, nous avons modifié le profil de courant de recharge du pack 1 à partir du cycle 33 en adoptant le profil du pack 2 : charge d'une heure à 15A, suivie d'une charge de 4heures à 5A et d'une charge illimitée temporellement à 2A :

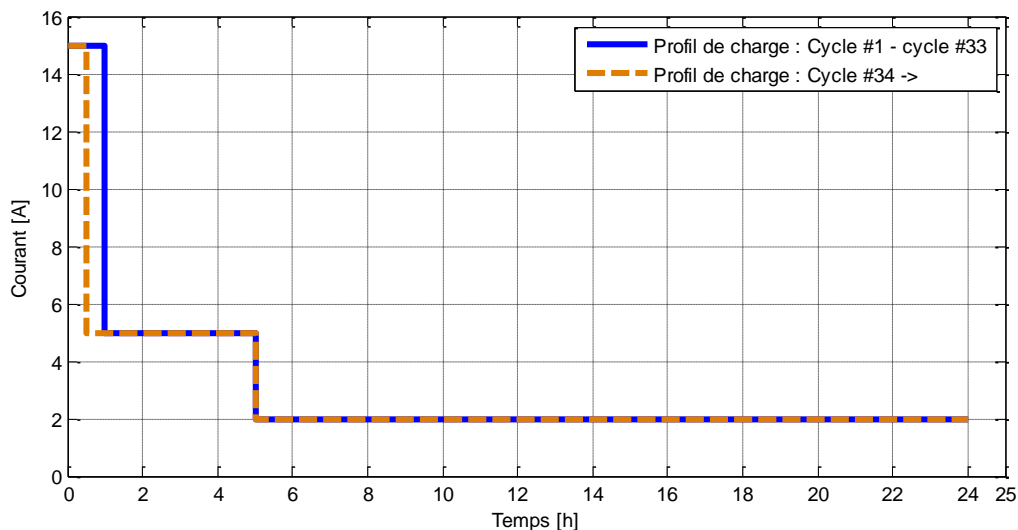


Figure 121 : Profils de recharge du pack 1

4.3.2 Résultats (en cours) du vieillissement

A la date de la rédaction de ce rapport nous avons cyclé 87 fois le **pack 2** (juin 2011 – juillet 2012) et 56 fois le **pack 1**.

Après consultations avec le fournisseur des batteries, nous avons décidé de prendre comme indicateur de vieillissement la perte de capacité d'une batterie. En mesurant la capacité d'une batterie par pack – les batteries UK06 pour le **pack 2** et UK92 pour le **pack 1** – par un cycle de charge-décharge (procédure CCCV décrite dans le paragraphe 3.3.3), nous faisons l'hypothèse de l'observation de l'évolution du vieillissement du pack. Pour effectuer les mesures de capacité nous avons arrêté le cyclage et extrait la batterie « témoin ». Après la mesure de sa capacité nous l'avons réinséré et rééquilibré le pack correspondant.

Sur la Figure 122 nous montrons l'évolution de la capacité des packs. Si le **pack 2** (simulant la BOM non-assistée), a perdu de la capacité dès le début du cyclage, le **pack 1** (simulant la BOM avec stockage mixte) se comporte très bien, sans aucune perte de capacité.

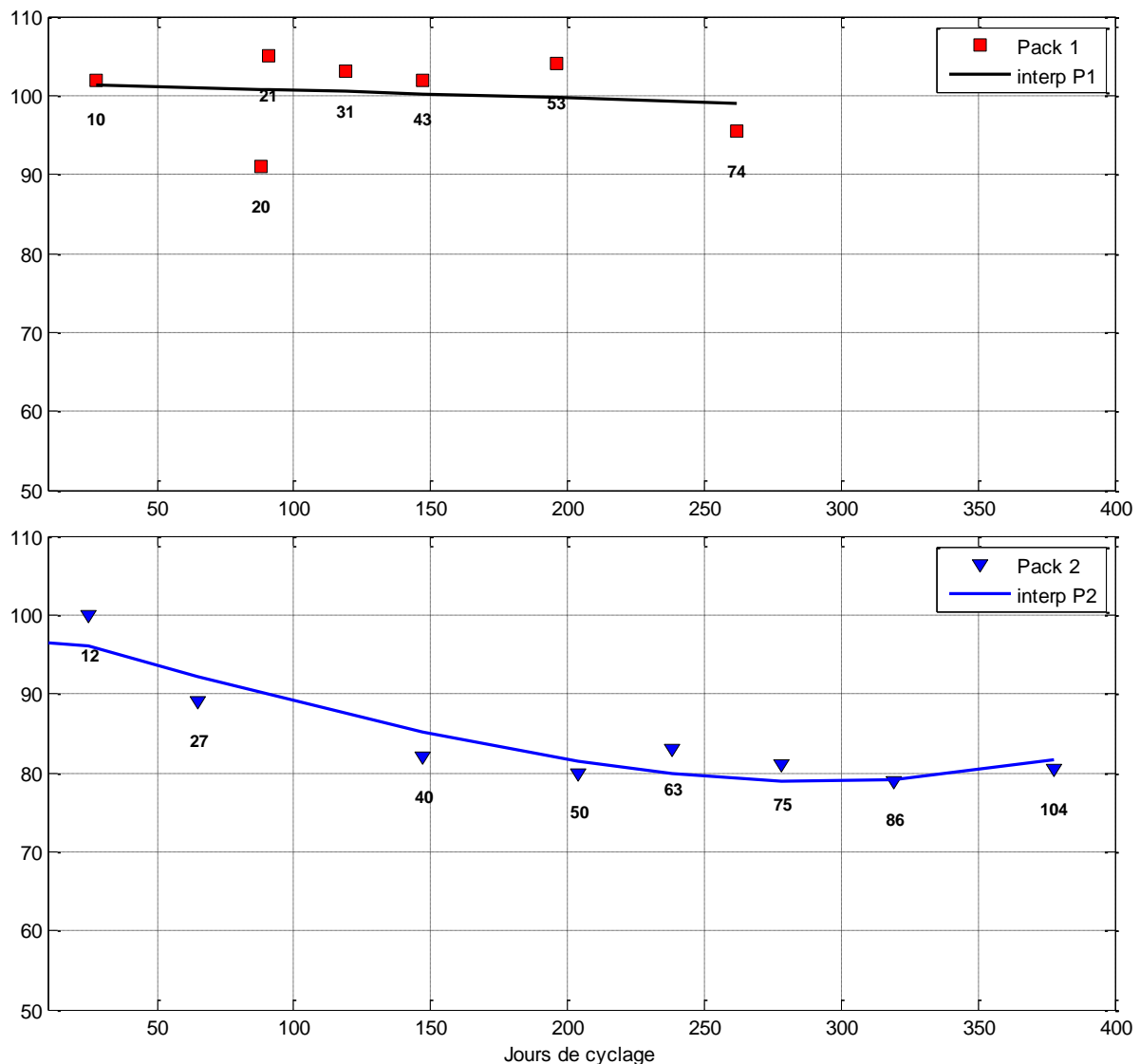


Figure 122 Evolution de la capacité des batteries suivies

La première raison de ce comportement différent pourrait être le profil de courant différent. Dans ce cas, nous venons de démontrer qu'un stockage mixte de supercondensateurs et batterie au plomb a une durée de vie plus longue que la batterie toute seule. Mais il pourrait avoir aussi l'influence de la recharge (certainement incomplète lors des 20 premiers cycles du **pack 2**) d'après le constructeur et celle des micro-cycles – présents dans le cyclage du **pack 2** mais pas dans le profil de courant du **pack 1**. Parmi ces causes nous pensons que la plus importante reste la cyclage.

Une autre manière d'observer la perte de capacité des packs est de mesurer la capacité déchargée lors de chaque cycle journalier (par l'intégration du courant). Cette méthode est moins précise que la mesure directe de la capacité mais permet de dégager une tendance générale.

Le point faible est lié à notre dispositif de sécurité qui interrompt le cyclage si une des tensions du pack est inférieure à 10.5V (exemple d'arrêt sur la Figure 123). Cette mesure de protection des batteries fait que lors des appels de courants forts il est possible qu'une des batteries du pack « s'effondre ». La cause peut être une résistance série plus élevée ou la diminution de la capacité d'une des batteries du pack, ou une batterie moins chargée que les autres (et avec une tension à vide plus faible). De plus, ce n'est pas toujours la même batterie qui interrompt le cyclage.

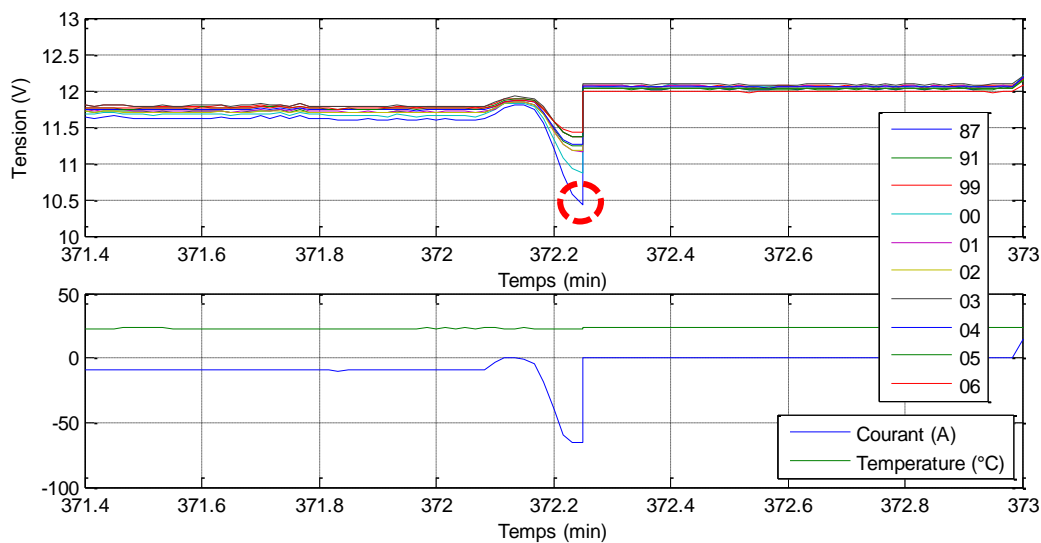


Figure 123 : Arrêt du cyclage dû au dépassement de la butée de 10,5V

Malgré ces faiblesses, nous présentons sur la Figure 124 la capacité déchargée du **pack 1** et du **pack 2**. Il est intéressant de voir que le pack 1 fournit toujours les 48Ah après plus de 50 charges-décharges, ce qui semble logique vu qu'il n'a pas perdu de sa capacité.

Le **pack 2**, illustrée sur la Figure 125, malgré le fait qu'il perd environ 20% de sa capacité, il est toujours capable de fournir les 49Ah pendant les 30 premiers cycles. Ensuite il fournit de moins en moins, jusqu'au cycle 64 où il n'arrive à fournir que 33Ah. A ce moment nous avons changé la méthode de recharge de ce pack (la charge à 2A constant avait disparu en se raccourcissant). Le « sursaut » n'a duré que quelques cycles, la tendance depuis étant de nouveau à la baisse.

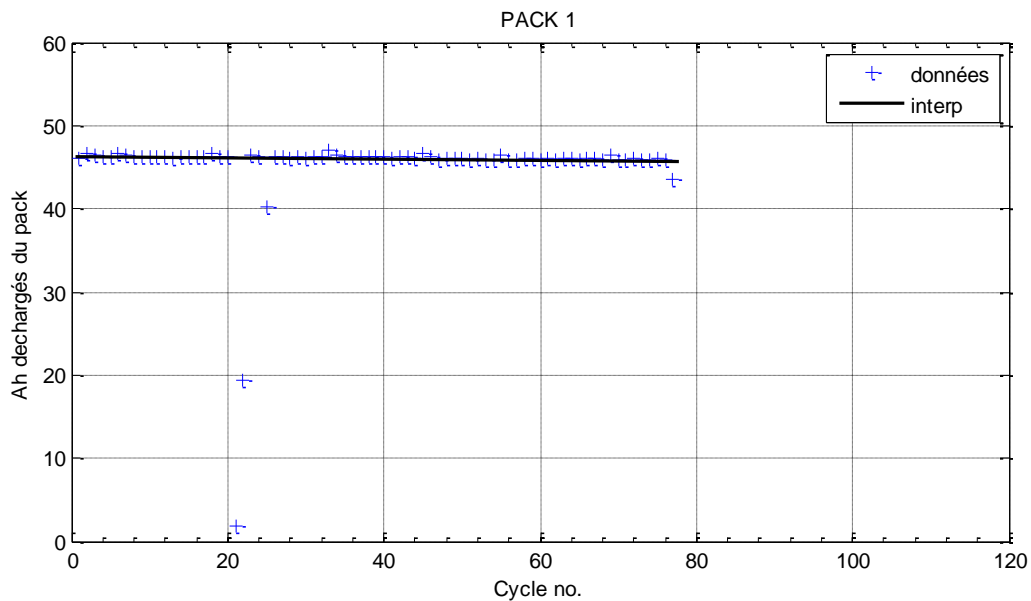


Figure 124 : Evolution de la capacité fournie par la batterie au fil des cyclages (Pack 1)

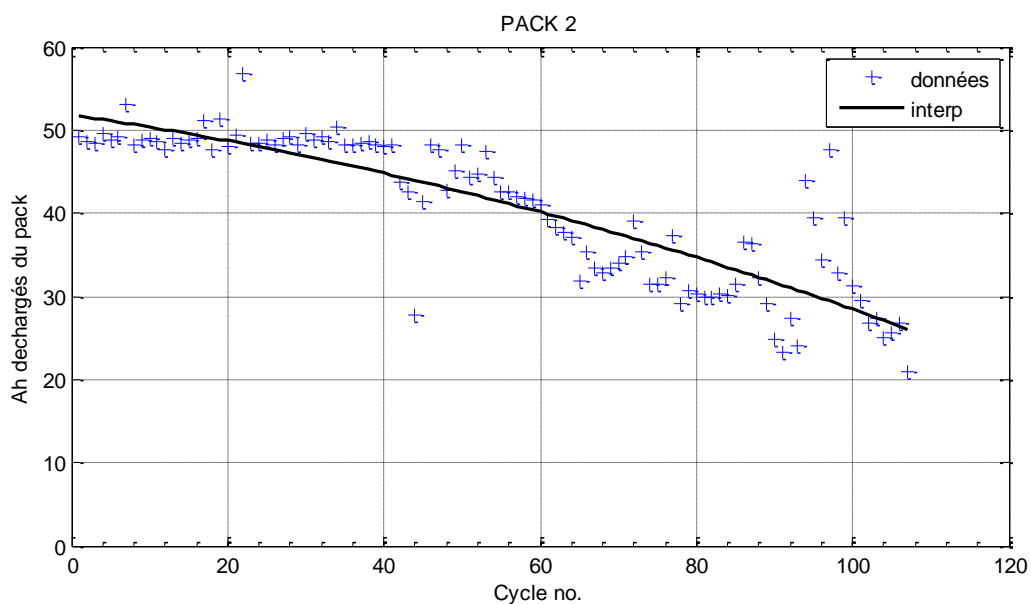


Figure 125 : Evolution de la capacité fournie par la batterie au fil des cyclages (Pack 2)

4.4 Conclusions

Dans le chapitre quatre nous avons tout d'abord vu l'influence d'un modèle fin de batterie au plomb sur la qualité, précision, de la modélisation de la benne à ordures ménagères. La limitation du courant de recharge de la batterie, en fonction de son état de charge, est l'élément le plus important du point de vue de l'estimation de la consommation électrique. Sur un cycle Artemis400, l'écart dans l'estimation de l'énergie consommée peut atteindre 30% !

En simulant le véhicule sur une journée entière, nous avons constaté qu'une benne alimentée par une batterie seule, sans assistance des supercondensateurs, consomme 17% de plus qu'une benne alimentée par un stockage mixte.

L'influence de la stratégie de partage du flux de puissance sur les performances et le dimensionnement du stockage ont été également étudiés. Nous avons trouvé une courbe du courant efficace de la batterie en fonction du courant maximal admissible dans la batterie typique de la stratégie de partage de la puissance par l'écrêtage du courant de la batterie. A l'aide de cette courbe nous pouvons choisir le bon pack de supercondensateurs et la valeur maximale du courant dans la batterie.

Le dimensionnement de la batterie tient compte du fait qu'en début de journée une batterie seule n'accepte pas des courants de recharge, mais qu'un stockage mixte bien dimensionné récupère cette énergie perdue. Et l'écart n'est pas des moindres, car le réservoir principal d'énergie, la batterie, peut être sous-dimensionnée d'environ 20%, ce qui pourrait constituer un gain de masse non-négligeable.

La deuxième partie du chapitre est consacrée à l'étude du vieillissement des batteries. La particularité de cette étude vient du fait que nous n'essayons pas d'établir un modèle de vieillissement en fonction d'un profil de courant théorique. Nous avons choisi en effet de comparer le vieillissement d'une batterie soumise à un profil de courant représentant une benne alimentée par une batterie seule, avec le vieillissement d'une batterie soumise à un profil de courant représentant une benne alimentée par un stockage mixte.

Les premiers résultats de cette comparaison sont très encourageants montrant un très bon comportement de la batterie assistée par supercondensateurs et une perte de capacité, assez importante, de la batterie non-assistée. Néanmoins ces expérimentations doivent continuer pour confirmer et de quantifier le gain en durée de vie.

5 Conclusion générale

Le travail présenté apporte une contribution à l'étude des stockages d'énergie à sources multiples. Nous avons étudié l'association d'une batterie au plomb associée à des supercondensateurs. L'étude a porté sur deux axes importants : au niveau système (modélisation d'un véhicule lourd, de type benne à ordures ménagères) et au niveau du composant (batterie au plomb).

La modélisation de la benne à ordures ménagères a pris en compte le profil de mission journalière, une loi de gestion d'énergie embarquée ainsi que le dimensionnement du stockage mixte. Ces trois éléments interagissent, sont indissociables et sont indispensables à une étude du système.

Le profil de mission de la BOM a été trouvé dans la base de données de l'IFSTTAR. La gestion de l'énergie à bord du véhicule suppose la limitation du courant batterie à une valeur bien choisie afin de réduire les pointes de puissance dans la batterie ainsi que le courant efficace. La présence des supercondensateurs et leur capacité influencent beaucoup les paramètres de la loi de gestion d'énergie. Par exemple, en limitant la recharge de la batterie, les microcycles de charge/décharge sont fortement réduits ce qui devrait jouer en faveur de l'augmentation de la durée de vie des batteries.

Nous avons également mis au point une procédure de dimensionnement des packs de batteries et de supercondensateurs. L'étude a montré que même un petit pack de supercondensateurs est capable de réduire de façon significative le courant efficace. Afin d'obtenir une économie d'énergie journalière importante, la taille du pack de supercondensateurs doit être augmentée. Nous avons mis en évidence que la réduction de masse obtenue par le stockage mixte par rapport à l'utilisation d'une batterie non-assistée ne permet pas une économie de masse significative. Par conséquent, nous pensons que le principal intérêt de l'hybridation des sources doit résider dans l'augmentation de la durée de vie des batteries. Afin de vérifier cette conclusion, nous avons entamé des essais de cyclage comparatifs, de deux packs de batteries soumises à des profils de courant issus de la simulation de la BOM alimentée par batteries et par stockage mixte. A la fin de la thèse, les premiers résultats du cyclage sont encourageants mais l'expérimentation doit être poursuivie et approfondie.

Le deuxième axe important a été la modélisation fine d'une batterie au plomb pour la simulation. Cette modélisation est basée sur un modèle de Randles et des méthodes connues d'indentification des paramètres, telles que la spectroscopie d'impédance et la chronoampérométrie. Le modèle tient compte de l'état de charge de la batterie et de la valeur du courant circulant dans la batterie. Le modèle de notre batterie ainsi obtenu tient compte des principales non-linéarités physico-chimiques. La recharge n'a pas été occultée car elle est très importante dans la capacité du véhicule à stocker et à réutiliser l'énergie issue du freinage récupératif. Afin de vérifier la généralisation du modèle et sa validité dans le cadre d'un pack, nous avons mis au point un banc de cyclage comparatif de deux packs chacun constitué de 10 batteries / pack en série. Un pack représente environ 1/8 du stockage réellement utilisée dans une BOM. Si le protocole de vérification de l'état des batteries (fastidieux par leur nombre) a été bien suivi, la recharge d'un pack batterie sans système d'équilibrage nous a montré de futures problématiques : comment finaliser la

charge et atteindre des SoC élevés pour chaque batterie, est ce que la présence d'un convertisseur spécifique pour la recharge est indispensable ?

Mais ces réflexions font partie des perspectives de travail à mener en parallèle avec l'éclaircissement de l'impact de l'ajout des SC dans les véhicules électriques, l'impact sur la durée de vie de la source principale d'énergie (batteries, pile à combustible, etc.)

6 Bibliographie

- [Ademe_SE, 2005] Schwarz V. « le stockage électrochimique », http://www.mines-energie.org/Dossiers/Stock2005_15.pdf, note de l'ADEME, 2005. (dernière visite le 01/06/2012).
- [Akli, 2008] Akli C.R., « Application à la locomotive hybride de démonstration et d'investigations en énergétique LHyDIE développée par la SNCF », Thèse de l'INP, 2008.
- [Allegre, 2010] Allegre A.L., « Méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides », thèse de l'Université Lille 1, 2010
- [Alstom, 2007] http://e-civis.org/21_Citadis,%20l'esprit%20de%20votre%20ville-Alstom.pdf
- [André, 1995] André M., « Characterization of the traffic conditions and driving cycles development using real-world driving measurements », International workshop on vehicle driving cycles, 1995.
- [Armasafe, 2012] http://www.hawkeraplus.com/pdf/armasafe_plus_brochure_2010.pdf
- [Bayindir, 2011] Bayindir K.Ç, Gözükcük M.A., Teke A. « A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units » Energy Conversion and Management 52 (2011) 1305–1313
- [Beranger, 2009] Béranger B., Chatroux D., Fernandez E., Fiette S., « Experience feedback on electric vehicles of the French car fleet – battery impact », PCIM, Nuremberg, 2009
- [Bouscayrol, 2000] Bouscayrol A., Davat B., de Fornel B., François B., Hautier J. P., Meibody-Tabar F., Pietrzak-David M., "Multi-machine multi-converter systems: applications to electromechanical drives", EPJ Applied Physics, Vol. 10, no. 2, May 2000, pp-131-147.
- [Butterbach, 2010] Butterbach S., Vulturescu B., Forgez C., Coquery G. et Friedrich G., "Design of a Supercapacitor-Battery Storage System for a Waste Collection Vehicle", IEEE VPPC'10, Lille, 2010.
- [Caf, 2010] http://www.caf.es/img/prensa/notprensa/20101124010447vialibre_nov2010_en.pdf consulté dernièrement en juin 2012
- [Cao, 2012] Cao J., Emadi A., "A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 1, janvier 2012, pp 122-132.
- [Carter, 2008] Carter R. et Cruden A., « Strategies for control of a battery/ supercapacitor system in an electric vehicle », IEEE SPEEDAM, Ischia, 2008.
- [Caumont, 2010] Caumont O., Brégeon L., Diguët M., Coquery G., Lallemand R., Demange F., Kauv J. « 9000F supercapacitor for energy storage system in future urban railway transportation systems » ESSCAP2010, Bordeaux 2010.
- [Ceraolo, 2000] Ceraolo M., « New dynamical models of lead-acid batteries », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15(4), pp. 1184-1190, 2000

[Chan, 2007] Chan C.C. « The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles » Proc. IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 704–718, Apr. 2007.

[Chau, 2002] Chau K.T., Wong Y.S., « Overview of power management in hybrid electric vehicles », Energy Conversion and Management, vol. 43, pp 1953–1968, 2002.

[Chen, 2009] Chen K., Bouscayrol A., Berthon A., Delarue P., Hissel D., Trigui R. « Global modeling of different vehicles, using Energetic Macroscopic Representation to focus on system functions and system energy properties » IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 4, no. 2, pp. 73–79, Jun. 2009.

[Courbevoie, 2011] <http://www.ville-courbevoie.fr/journalistes/communiqués/benne-ordure-electrique/> (dernière visite le 10/10/2011).

[CGDD, 2010] «La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008», Commissariat Général au Développement Durable, décembre 2010.

[Daimler, 2011] Les citaro FuelCELL hybrides de Daimler, <http://www.evobus.com/inter-evobus/0-674-399759-1-1417298-1-0-0-0-0-1-6990-0-0-0-0-0-0-0.html>, (dernière visite le 10/10/2011).

[Darchen, 2010] Darchen A., « K800 - Électrochimie appliquée - Caractérisations des systèmes électrochimiques », Techniques de l'Ingenieur, 10 mai 2010.

[Dillensenger, 2004] Dillensenger G., « Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours », Thèse de l'Université Montpellier II, 2004

[Do, 2010] Do D.V, « Diagnostic de batteries Lithium ion dans des applications embarquées » Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne, 2010.

[Economist, 2010] The Economist, « Hybrid locomotives : The Prius principle », 27 décembre 2010

[ElectroniquesS, 2011] <http://www.electroniques.biz/editorial/413725/une-technologie-hybrid>

[Emadi, 2005] Emadi A., Rajashekara K., Williamson S.S., Lukic S.M. « Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations » IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 54, no. 3, May 2005

[Eurobat, 2012] Association of European Automotive and Industrial Battery Manufacturers, www.eurobat.org (dernière visite le 01/06/2012).

[Flybridsystems, 2012] The original Flybrid Kinetic Energy Recovery System , <http://www.flybridsystems.com/F1System.html>, (dernière visite le 01/06/2012).

[Friedman, 2003] Friedman D., « The Technology and Potential of Hybrid Vehicles », Livre, ed. Union of Concerned Scientists, 2003

[Frohlich, 2010] Frohlich M., Klohr M. et Rost J., « Energy storage on board of railway vehicle », PCIM, Nuremberg, 2010.

[Fujii, 2004] Fujii T., Teraya N., Osawa M., « Development of an NE train » JR EAST Technical Review-No.4, p. 62-70.

- [Fuller, 2011] Fuller J. and Atkins A., « Hardware Development of FLYBUS – Flywheel Based Mechanical Hybrid Systems for Bus & Commercial Vehicles », 2nd VDI Conference “Transmission in Commercial Vehicles 2011”, 07 and 08 June in Friedrichshafen, 2011.
- [Gao, 2009] Gao J-P., Zhu G-M. G., Strangas E.G., Sun F-C. « Equivalent fuel consumption optimal control of a series hybrid electric vehicle » Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, 2009, 223 (D8), 1003-1018. DOI: 10.1243/09544070JAUTO1074
- [Guidi, 2009] Guidi G., Undeland T.M. et Hori Y., « Effectiveness of Supercapacitors as Power-Assist in Pure EV Using a Sodium-Nickel Chloride Battery as Main Energy Storage », EVS24, Stavanger, Norway, May 2009.
- [Hammar, 2006] Hammar A., Lallemand R., Venet P., Coquery G., Rojat G., Chabas J. « Electrical characterization and modelling of round spiral supercapacitors for high power applications » ESSCAP, Lausanne, Switzerland (2006)
- [He, 2012] He Y., Chowdhury M., Pisu P., Mac Y. « An energy optimization strategy for power-split drivetrain plug-in hybrid electric vehicles » Transportation Research Part C 22 (2012) 29–41
- [Hess, 2007] Site du constructeur, <http://www.hess-ag.ch/en/busse/trolleybusse/lightram.php>, dernière visite le 01/06/2012).
- [EERE, 2005] The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) - Advanced Vehicle Testing Activity, <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/avta/overview.html>, dernière visite le 01/06/2012).
- [INSEE, 2010] «Les Franciliens consacrent 1 h 20 par jour à leurs déplacements», INSEE Ile-De-France, n°331, avril 2010.
- [Jossen, 2006] Jossen A., « Fundamentals of battery dynamics », Journal of Power Sources, no 154, pp 530–538, 2006
- [Karami, 2009] Karami H., Masoomi B., and Asadi R., «Recovery of discarded sulfated lead-acid batteries by inverse charge», Energy Conversion and Management, Volume 50, Issue 4, Pages 893–898, Avril 2009.
- [Karden, 2001] Karden S. «Using low-frequency impedance spectroscopy for characterization, monitoring, and modeling of industrial batteries » Verlag, S. (ed.) Shaker Verlag, 2001.
- [Khaligh, 2010] Khaligh A., Li Z., "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art" IEEE Transactions on Vehicule Technology, vol. 59, no. 6, juillet 2010, pp 2806-2814
- [Khun, 2006] Khun E., Forgez C., Lagonotte P., Friedrich G., « Modelling Ni-mH battery using Cauer and Foster structures », Journal of Power Sources 158 (2006) 1490–1497.
- [MAN, 2010] http://www.transport-efficiency.com/media/content_medien/doc/MAN_HybridFlyerA5_09_final.pdf.

- [Mayer, 1989] Mayer, D. & Biscaglia, S. « Modelling and analysis of lead acid battery operation Telecommunications Energy Conference », INTELEC '89. Conference Proceedings., Eleventh International, pp. 23.3/1-23.3/6 vol.2, Florence, 1989.
- [Mauracher, 1997] Mauracher P. & Karden E., « Dynamic modelling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification », Journal of Power Sources, Vol. 67(1-2), pp. 69 - 84, 1997.
- [Mercedes, 2012] http://www.mercedes-benz.es/content/media_library/hq/hq_mpc_reference_site/bus_ng/services_accessories/brochures/FUEL_CELL/fuel_cell_technical_data_2009_en.pdf.object-Single-MEDIA.tmp/MBO09003_Citaro_FuelCELL-Hybrid_EN.pdf (dernière visite du site le 05/07/2012)
- [Mester, 2007] Mester V., « Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique », Thèse de l'École Centrale de Lille, 2007
- [Microbus, 2008] Rapport final du projet MICROBUS HYBRIDE SERIE, projet ANR, Réf. ADEME : 04 66 C0029, 2008
- [Mierlo, 2006] Mierlo J.V., Maggetto G., Lataire Ph., « Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles », Energy Conversion and Management 47 (2006) 2748–2760.
- [Miller, 2005] Miller J. M., McCleer P. J., Everett M., Strangas E. G., « Ultracapacitor Plus Battery Energy Storage System Sizing Methodology for HEV Power Série-parallèle Electronic CVT's », IEEE ISIE 2005, June 20-23, 2005
- [Miller, 2007] Miller A.R., Hess K.S., Barnes D.L. et Erickson T.L., « Zero-Emission, Hydrogen-Fuelcell Locomotive for Urban Rail », Vehicle projet LLC, Denver, 2007.
- [Mitrac, 2009] datasheet du constructeur Bombardier, http://www.bombardier.com/files/en/supporting_docs/Mitrac_Energy_Saver.pdf , (visite le 07/10/2011)
- [Moskowitz, 2010] Moskowitz J.-P., Cohuau J-L., « STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation », VPPC2010
- [Moura, 2010] Moura S.J., Callaway D.S., Fathy H.K., Stein J.L., « Tradeoffs between battery energy capacity and stochastic optimal power management in plug-in hybrid electric vehicles », Journal of Power Sources, vol 195, pp 2979–2988, 2010.
- [Offer, 2010] Offer G.J., Howeyb D., Contestabile M., Clague R., Brandon N.P., « Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system », Energy Policy, ed. elsevier, vol. 38, pp 24–29, 2010.
- [Ortúzar, 2007] Ortúzar M., Moreno J., Dixon J., "Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 4, august 2007, pp. 2147-2156.

- [Pillot, 1990] Pillot D., André M., Vidon R. & Pruvost C., « Cinématique typique d'un véhicule B.O.M. », rapport INRETS, pp. 14, 1990
- [Piller, 2001] Piller S., Perrin M., Jossen A., Methods for state-of-charge determination and their applications, *J. Power Sources*, 96, 113–120 (2001)
- [RGCF, 2011] Revue générale des chemins de fer, no. 201, « Les locomotives hybrides d'Alstom » janvier 2011.
- [RGCF, 2012] Revue Générale des Chemins de Fer, no. 215, « Plathée : la locomotive hybride de la SNCF », avril 2012.
- [Robert, 2004] Robert J., Alzieu J., « D3352 - Accumulateurs - Accumulateurs au plomb, Techniques de l'Ingénieur, Traité Convertisseurs et machines électriques », novembre 2004.
- [Ruetschi, 2004] Ruetschi P., « Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries », *Journal of Power Sources*, no 127, pp 33–44, 2004.
- [Salmasi, 2007] Salmasi R.J., « Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 56, No. 5, septembre 2007
- [Scordia, 2004] Scordia J., « Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides », Thèse de l'Université de Henry Poincaré - Nancy 1, 2004
- [Schiffer, 2007] Schiffer, J., Sauer D.U., Bindner H., Cronin T., Lundsager P. Kaiser R. « Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems » *Journal of Power Sources*, Vol. 168(1), pp. 66 - 78, 2007
- [Schouten, 2002] Schouten N. J., Salman M. A., and Kheir N. A., « Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles », *IEEE, Transactions on control systems technology*, Vol. 10, No. 3, May 2002
- [Subat, 2006] Van den Bossche P., Vergels F., Van Mierlo J., Matheys J., Van Autenboer W., « SUBAT: An assessment of sustainable battery technology » *Journal of Power Sources* 162 (2006) 913–919.
- [Syed, 2011] Syed S.A., Lhomme W., Bouscayrol A., Vulturescu B., Butterbach S., Pape O., Petitdidier B. « Inversion based Control of Series-Parallel HEV for Municipal Trucks » *Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago (USA)*, 2011.
- [TempMontsouris, 2010] <http://www.lameteo.org/paris.html> données sur la température mesurée à Montsouris depuis 1873 (dernière visite le 02/07/2012).
- [Thiounn-Germeur, 2011] Thiounn-Germeur M., « Evaluation of the hybrid locomotive 'Plathée' - A platform for energy Efficiency and Environmentally Friendly Hybrid Trains », *WCRR 2011, Lille, 2011*
- [Thounthong, 2009] Thounthong P., Rael S. et Davad B., « Energy Management of Fuel Cell/Battery/ Supercapacitor Hybrid Power Source for Vehicle Applications », *Journal of Power Sources*, Vol 193(1), pp 376–385, 2009.

[Toshiba, 2010] <http://www.toshiba.co.jp/sis/railwaysystem/en/products/locomotive/hybrid.htm>, consulté dernièrement en juin 2012.

[Trieste, 2012] Trieste S., « Exploitation et dimensionnement optimisé d'un ensemble convertisseur-supercondensateurs pour l'énergie d'un véhicule », EPF 2012, Bordeaux, juillet 2012

[Trigui, 2004] Trigui R., Jeanneret B., Badin F. « Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques, construction de bibliothèque de modèles VEHLIB ». Revue Recherche Transport et Sécurité-(RTS) n°83 Avril- Juin 2004, ISSN 0761-8980.

[VYCON, 2012] http://www.oro.walkingitaly.com/tusoro/solare/pdf/VYCON_VDC_Data-1.pdf

[Vulturescu, 2010] Vulturescu B., Butterbach S., Forgez Ch., Coquery G., Friedrich G., « Ageing study of a supercapacitor-battery storage system » ICEM 2010, Rome (Italie), 2010.

[Won, 2003] Won J.-S., « Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle », Thèse de l'université Texas A&M university, 2003.

[Xiong, 2009] Xiong W., Zhang Y. et Yin C., « Optimal energy management for a series-parallel hybrid electric bus », Energy Conversion and Management, Issue 50, pages 1730–1738, 2009.

[Yoo, 2008] Yoo H., Sul S., Park Y., Jeong J. "System Integration and Power-Flow Management for a Series Hybrid Electric Vehicle Using Supercapacitors and Batteries" IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 1, janvier/fevrier 2008, pp. 208-214.

[Zhan, 2003] Zhan C.-J., Wu X., Kromlidis S., Ramachandramurthy V., Barnes M., Jenkins N. et Ruddell A. « Two electrical models of the lead-acid battery used in a dynamic voltage restorer Generation », Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 150(2), pp. 175-182, 2003

ANNEXES

Annexe 1 : Désulfatation de la UK97

Les premières mesures de la capacité de la batterie UK97 ont montré une capacité initiale faible, la moitié de la capacité $C_{10}=110\text{Ah}$ des autres batteries du lot. Nous avons aussi constaté que le courant de charge maximal, pour une recharge rapide (Figure 126), n'était que de 80A sous 14,28V. Cette valeur est à comparer au courant maximal de 210A pour une autre batterie. Les autres paramètres mesurés, résistance interne et l'impédance interne, ne montraient pas de différence significative par rapport aux autres batteries du lot.

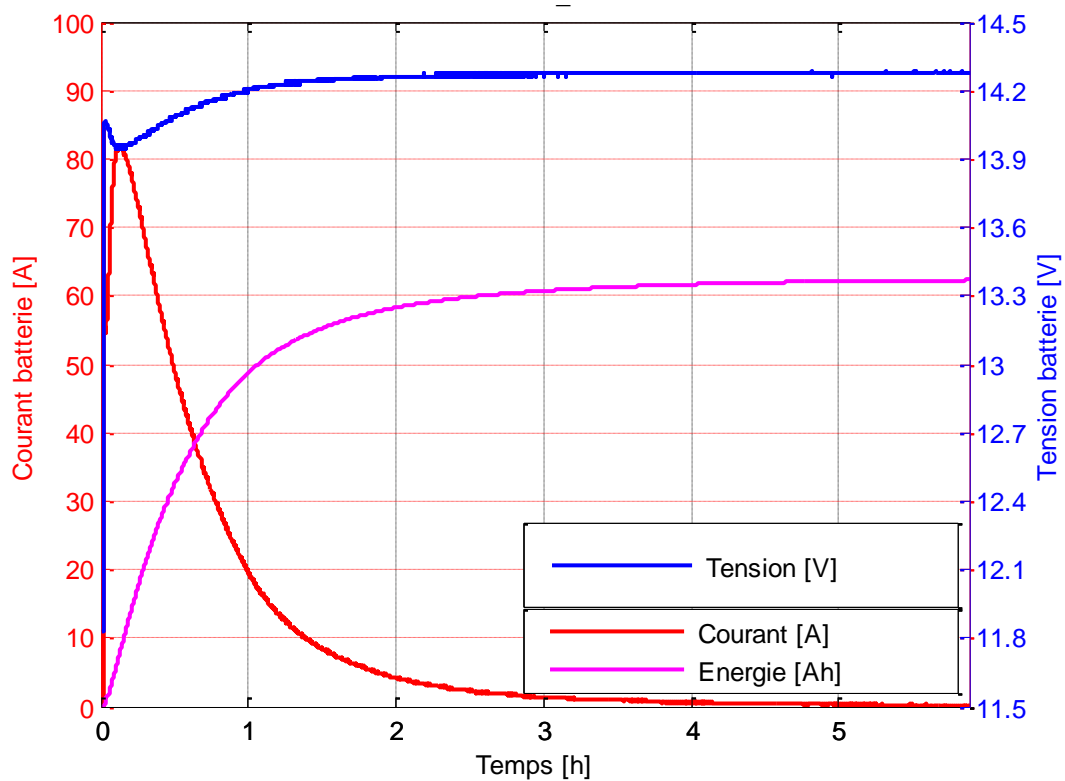


Figure 126 : Recharge rapide de la batterie UK97

Suite aux conseils du fabricant, nous avons procédé à une désulfatation de la batterie. Le protocole suggéré par le fabricant a été de recharger la batterie vide sous une tension constante élevée, et de l'abaisser quand le courant diminue après son maximum.

Le premier essai est illustré sur la Figure 127:

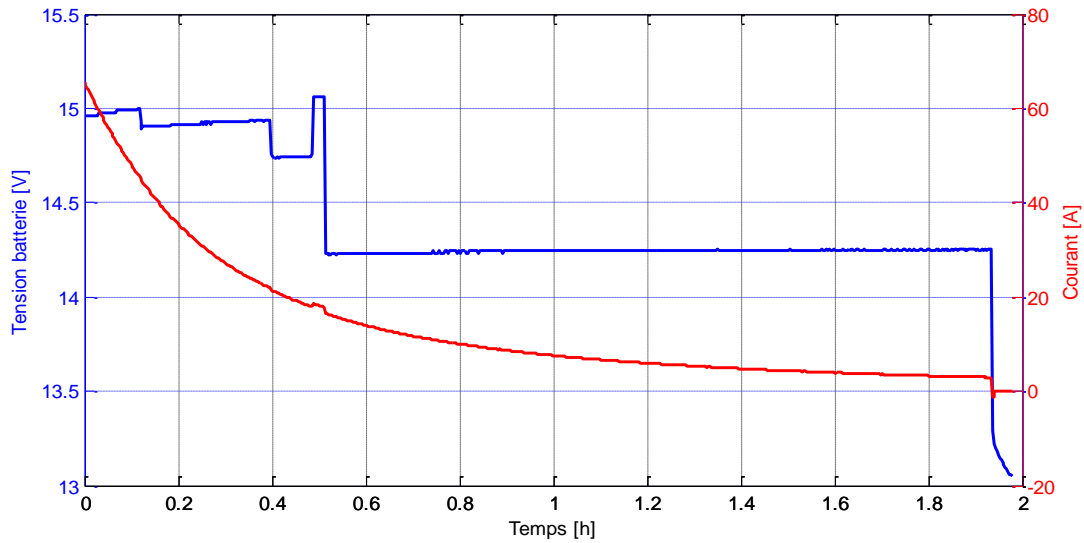


Figure 127 : 1^{ère} désulfatation

Nous avons appliqué une tension de 15V mais le courant n'a pas dépassé 95A. La capacité de la batterie à 10A (procédure de mesure CCCV précédemment) a augmenté d'environ 30% (passage de 55Ah à 70Ah).

Nous avons répété l'essai une deuxième fois, toujours sous une tension de 15V (il est illustré sur la Figure 128). Le courant atteint une valeur maximale de 160A sous une tension de 15V. La charge ainsi fournie est de 70Ah (estimée par l'intégration du courant de recharge).

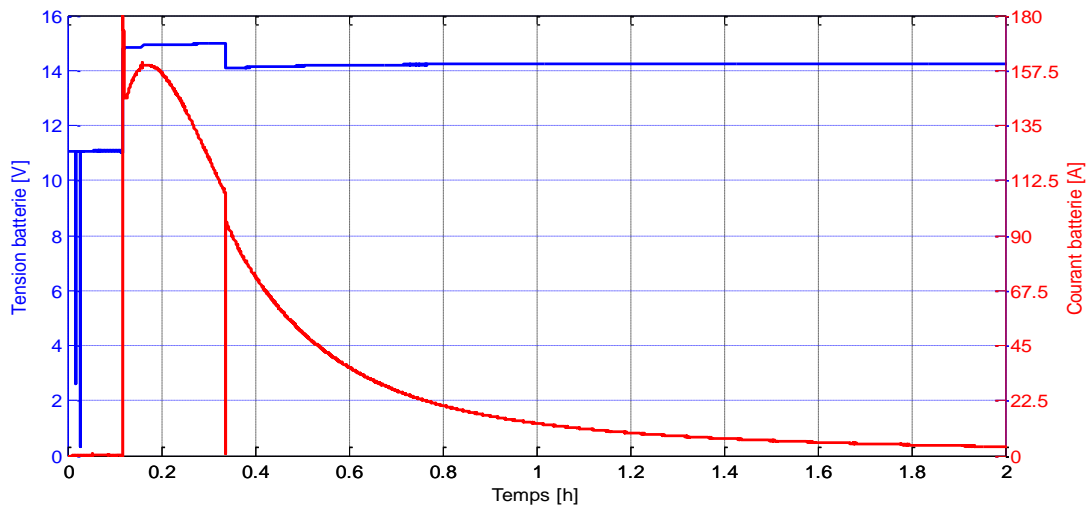
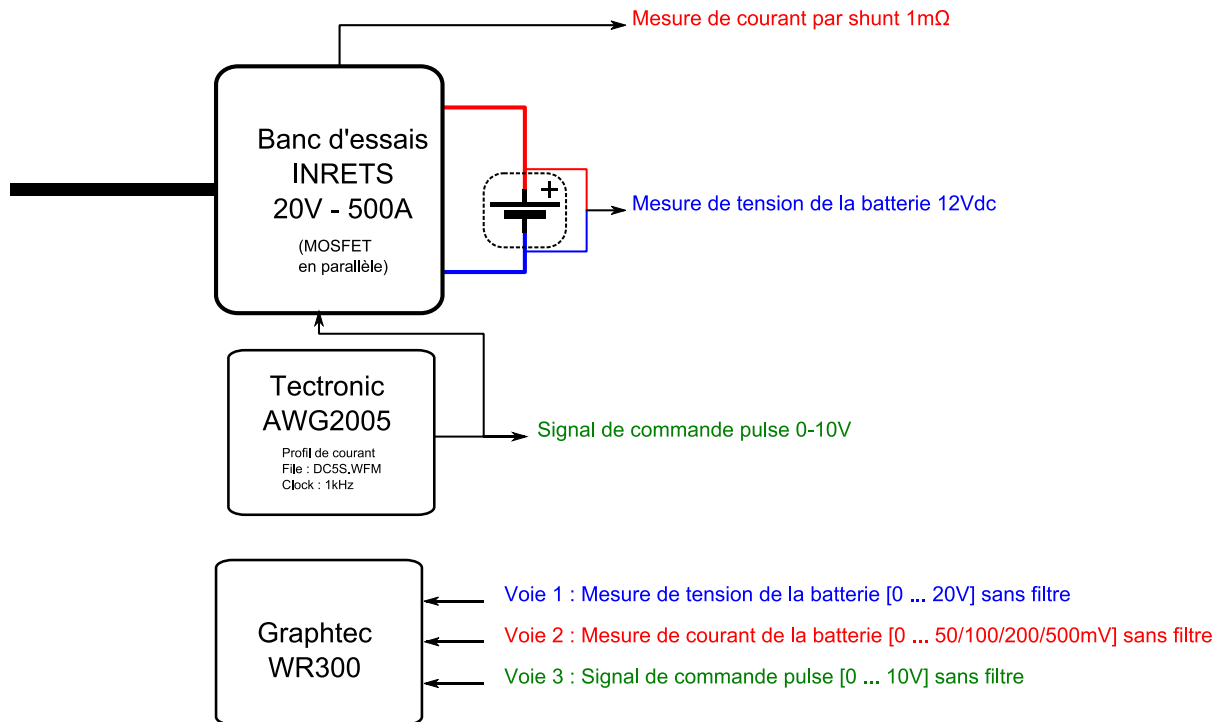


Figure 128 : 2^{ème} désulfatation

Initialement, nous avons cyclé la batterie une dizaine de fois (Capacité mesurée $C_{10} = 50\text{Ah}$) avant de réaliser deux procédures de désulfatation. La capacité mesurée C_{10} de la batterie UK97 est alors passée de 45Ah à 70Ah. En parallèle, le courant maximum de charge est passé de 80A jusqu'à atteindre 160A.

Annexe 2 : Les erreurs de mesures

Schéma d'essais pour le calcul de la résistance interne :



Métrologie :

- *Graphtec WR300 : Mesure de tension jusqu'à 200V_{DC} ; signaux mesurés avec une fréquence d'échantillonnage de 1μs max et sur 12Bits de données ; Fréquence de mesure en DC : du continu jusqu'à 200kHz (-3dB) (de 10Hz à 200kHz pour le mode AC). Précision de mesure ±0.25% sur le calibre sélectionné.*
- *Banc d'essais INRETS (MOSFET en parallèle) : Banc d'essais pour décharge à courant constant de 0A à 500A pour une tension maximale de 20V.*
- *Shunt de courant de 1mΩ (LEM 250 1mΩ 224 0.2%)*

Calcul des erreurs de mesures :

- *Mesure de la tension de la batterie*

La mesure de la tension de la batterie est une mesure directe de la différence de potentiel entre les bornes de la batterie. L'enregistreur Graphtec WR310 mesure cette tension à l'aide de 2 fils torsadés d'une longueur de 1m50.

L'erreur de mesure est :

$$\Delta U_{\text{Graphtec}} = \Delta U_{\text{Entrée graphtec}} + \Delta U_{\text{Bit graphtec}}$$

Avec : $\Delta U_{\text{GRAPHTEC}}$ est l'erreur de mesure de l'étage d'entrée du Graphtec

$$\Delta U_{\text{Entrée graphtec}} = \text{Erreur}_{\text{Relative}} \text{Calibre}_{\text{Graphtec}}$$

$$\Delta U_{\text{Entrée graphtec}} = \text{Calibre}_{\text{Graphtec}} \frac{0,25}{100}$$

ΔU_{BIT} est l'erreur créée par le bit de conversion du Graphtec

$$\Delta U_{\text{Bit graphtec}} = \frac{\text{Calibre}_{\text{Graphtec}}}{\text{Nombre Bit}}$$

$$\Delta U_{\text{Bit graphtec}} = \text{Calibre}_{\text{Graphtec}} \frac{1}{2^{12}}$$

Nous obtenons alors :

$$\Delta U_{\text{Graphtec}} = \text{Calibre}_{\text{Graphtec}} \frac{0,25}{100} + \text{Calibre}_{\text{Graphtec}} \frac{1}{2^{12}}$$

$$\Delta U_{\text{Graphtec}} = \text{Calibre}_{\text{Graphtec}} \left(\frac{0,25}{100} + \frac{1}{2^{12}} \right) \# \text{Calibre}_{\text{Graphtec}} \mathbf{0,274\%}$$

Calibre	Erreur de mesure
50mV	± 137µV (0,27%)
100mV	± 274µV (0,27%)
200mV	± 549µV (0,27%)
500mV	± 1,37mV (0,27%)
1V	± 2,74mV (0,27%)
5V	± 13,7mV (0,27%)
10V	± 27,4mV (0,27%)
20V	± 54,9mV (0,27%)

- *Mesure du courant circulant dans la batterie*

La mesure du courant se fait à l'aide d'un shunt de 1mΩ. La mesure de la tension ainsi créée se fait grâce à l'aide d'un Graphtec WR310. Le fil de mesure est un fil coaxial.

$$U_{\text{Graphtec}} = R_{\text{Shunt}} I_{\text{Mesuré}}$$

$$I_{Mesuré} = \frac{U_{Graphtec}}{R_{Shunt}}$$

$$\Delta I_{Mesuré} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_{Mesuré}}{\partial U_{Graphtec}} \Delta U_{Graphtec}\right)^2 + \left(\frac{\partial I_{Mesuré}}{\partial R_{Shunt}} \Delta R_{Shunt}\right)^2}$$

$$\Delta I_{Mesuré} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{Graphtec}}{R_{Shunt}}\right)^2 + \left(-\frac{U_{Graphtec}}{R_{Shunt}^2} \Delta R_{Shunt}\right)^2}$$

$$\Delta I_{Mesuré} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{Graphtec}}{R_{Shunt}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{Shunt}}{R_{Shunt}} I_{Mesuré}\right)^2}$$

Avec :

$$\begin{cases} R_{Shunt} = 1m\Omega \\ \Delta R_{Shunt} = \frac{0,2}{100} R_{Shunt} \\ \Delta U_{Graphtec} = Calibre_{Graphtec} \left(\frac{0,25}{100} + \frac{1}{2^{12}}\right) \end{cases}$$

Nous obtenons alors

$$\Delta I_{Mesuré} = \sqrt{\left(\left(\frac{0,25}{100} + \frac{1}{2^{12}}\right) 1000 Calibre_{Graphtec}\right)^2 + \left(\frac{0,2}{100} I_{Mesuré}\right)^2}$$

Consigne du courant	Calibre Graphtec	Erreur de mesure
30A	50mV	± 150mA (0,50%)
80A	100mV	± 318mA (0,39%)
150A	200mV	± 625mA (0,42%)
200A	200mV	± 679mA (0,34%)
400A	500mV	± 1,59A (0,39%)

- Estimation de l'erreur produite par le calcul de la résistance interne de la batterie

Le calcul de la résistance interne se fait à partir de la variation de la tension aux bornes de la batterie lors de la décharge ou charge de la batterie.

$$R_{batterie} = \frac{U_{initial} - U_{final}}{I_{initial} - I_{final}}$$

$$\Delta R_{batterie} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{batterie}}{\partial U_{initial}} \Delta U_{initial}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{batterie}}{\partial U_{final}} \Delta U_{final}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{batterie}}{\partial I_{initial}} \Delta I_{initial}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{batterie}}{\partial I_{final}} \Delta I_{final}\right)^2}$$

avec :

$$\Delta R_{batterie} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{initial}}{I_{initial} - I_{final}}\right)^2 + \left(\frac{-\Delta U_{final}}{I_{initial} - I_{final}}\right)^2 + \left(\frac{U_{initial} - U_{final}}{(I_{initial} - I_{final})^2} \Delta I_{initial}\right)^2 + \left(\frac{-(U_{initial} - U_{final})}{(I_{initial} - I_{final})^2} \Delta I_{final}\right)^2}$$

En simplifiant, nous obtenons alors :

$$\Delta R_{batterie} = \sqrt{2 \left(\frac{\Delta U_{Graphtec}}{I_{initial} - I_{final}}\right)^2 + 2 \left(\frac{U_{initial} - U_{final}}{(I_{initial} - I_{final})^2} \Delta I_{shunt}\right)^2}$$

Annexe 3 : Profil ARTEMIS 400

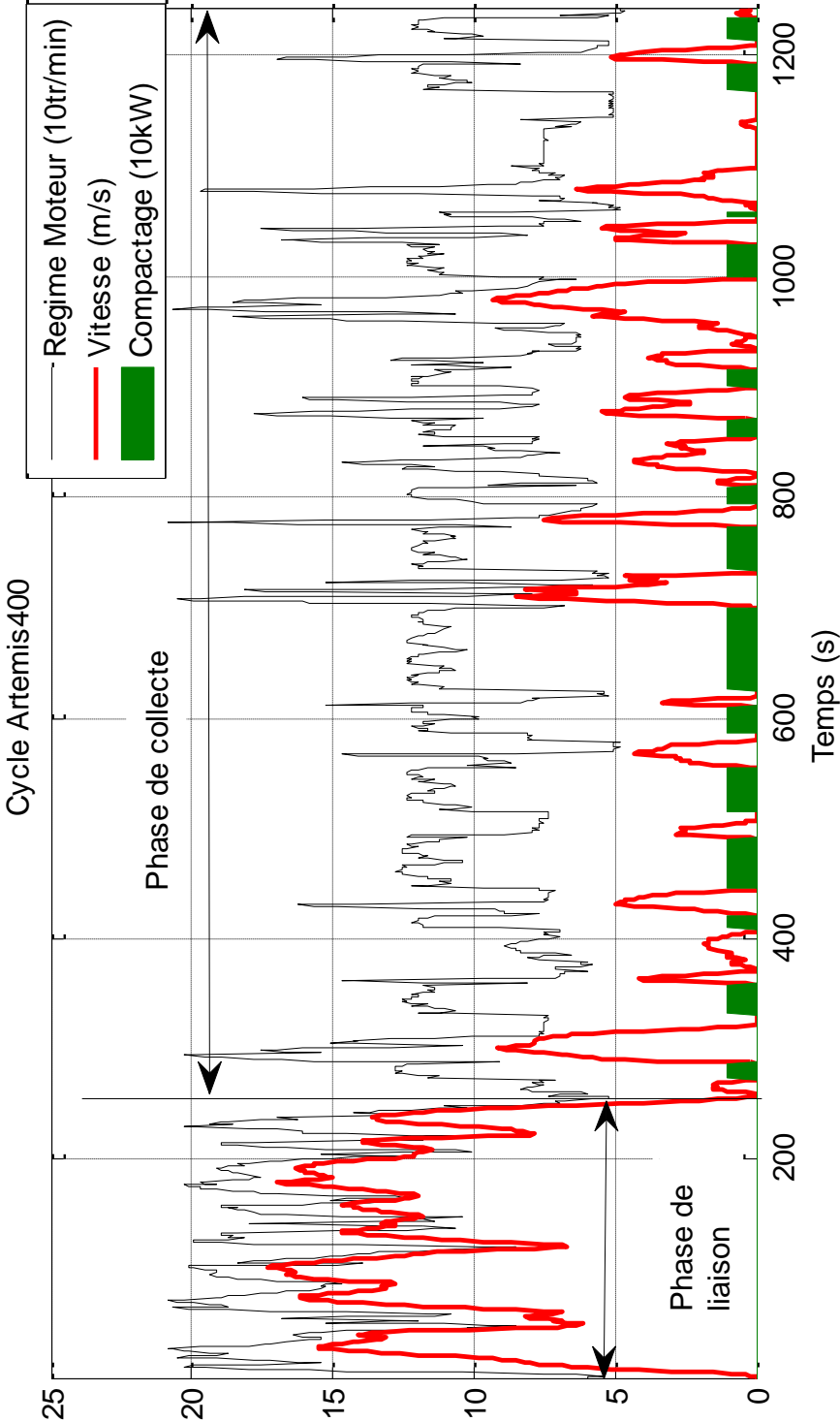
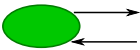
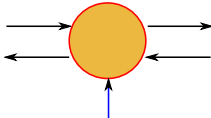
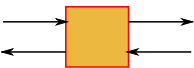

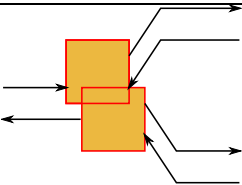
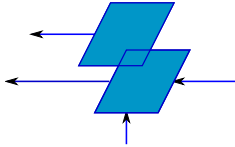
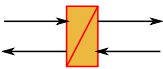




Figure 129 : profil de mission de la BOM

Annexe 4 : REM

La REM (Représentation Énergétique Macroscopique) est une représentation graphique synthétique basé sur le principe d'action réaction entre deux éléments interconnecté. Le principe de la REM est entièrement basé sur la causalité. Elle est basée sur des éléments normalisés et colorisés de base qui représente une source d'énergie, des éléments permettant la conversion entre plusieurs grandeurs physiques, des éléments de stockage et des éléments de couplage (voir tableau ci-dessous).

Une loi de commande est systématiquement déduite à partir de la REM en utilisant les règles d'inversion. Premièrement, en fonction de la finalité et des limitations du système, une chaîne d'éléments est définie. Ensuite, la chaîne de contrôle est construite par l'inversion de la chaîne d'éléments. Il est à noter que les éléments d'accumulation ne peuvent être inversés physiquement car ils sont dépendants du temps. Tous les autres éléments sont, quant à eux, inversibles. Les éléments de couplage nécessitent, lors de leur inversion, une entrée supplémentaire qui est une mesure d'une grandeur physique. Le bloc stratégie permet le contrôle global de la structure ainsi représentée. Le bloc stratégie autorise ou limite les demandes du conducteur en fonction de, par exemple, l'état de charge des éléments de stockage (batteries et supercondensateurs), des zones de fonctionnement optimal du moteur thermique ou de la réduction de la pollution sonore et atmosphérique.

	Source d'énergie		Machine électrique avec sa commande en couple
	Couplage mono-physique (sans élément de stockage d'énergie)		Bloc de contrôle : Inversion du couplage mono-physique
	Couplage multi-physique (sans élément de stockage d'énergie)		Bloc de contrôle : Inversion du couplage multi-physique
	Élément contenant un élément de stockage d'énergie		Bloc de contrôle : Contrôleur
		Bloc de contrôle général	

Annexe 5 : Comparaison entre deux stratégies de gestion du flux de puissance entre la batterie et le pack de supercondensateurs

Nous avons évoqué dans le paragraphe 2.3.2 la possibilité de limiter le courant vu par la batterie au niveau de la batterie même (I_{Batt} sur la figure suivante) ou au niveau du bus continu (à la sortie du convertisseur d'interface), I_{CVS_Batt} sur la figure suivante. Pour un souci de facilité de la lecture, nous appelons la première stratégie **SBatt** et la deuxième **SCVS**.

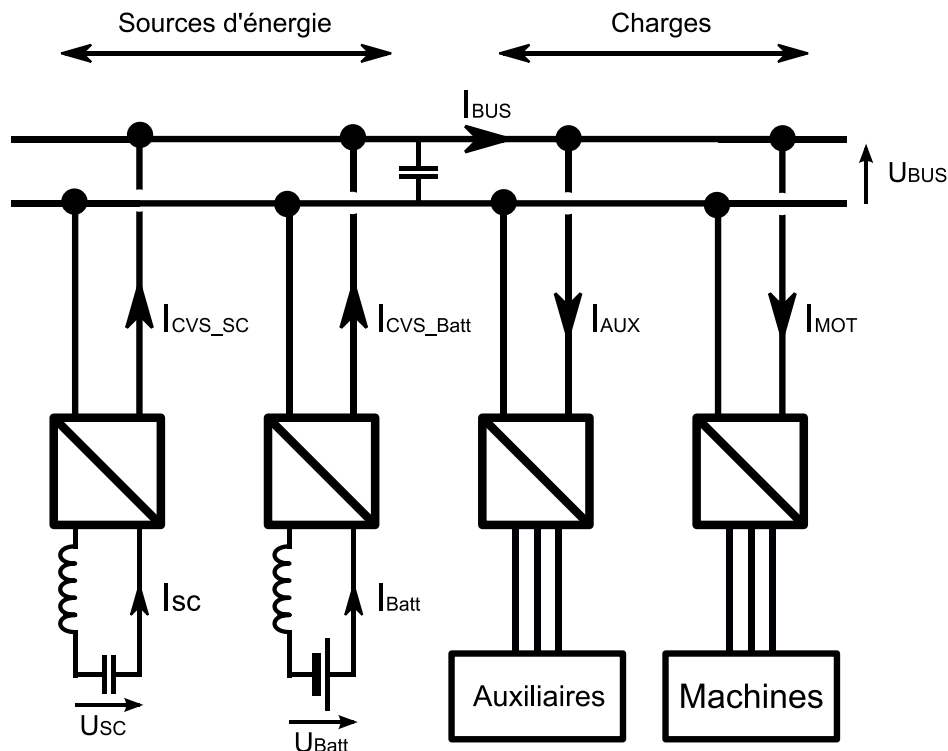


Figure 130 : Schéma électrique simplifié de la BOM

Dans le mémoire nous avons choisi de présenter la stratégie **SCVS** (basée sur l'écrouissage du courant I_{CVS_Batt} , exemple sur la Figure 132) et uniquement dans cette annexe, et brièvement, la stratégie **SBatt** (basée sur la limitation du courant I_{Batt} , exemple sur la Figure 131).

Malgré la forte ressemblance entre les deux stratégies, on perçoit des différences notables. Tout d'abord il faut préciser l'hypothèse des simulations suivantes : nous avons limité I_{Batt} et I_{CVS_Batt} à la même valeur et non pas à la même puissance ... Les autres conditions de simulation sont : modèle fin de la batterie, 2 branches de 34 batteries en série, pack de supercondensateurs de 15F.

Nous constatons que le courant de la batterie est parfaitement maîtrisé dans la stratégie **SBatt**, qu'il ne dépasse pas le seuil de 25A :

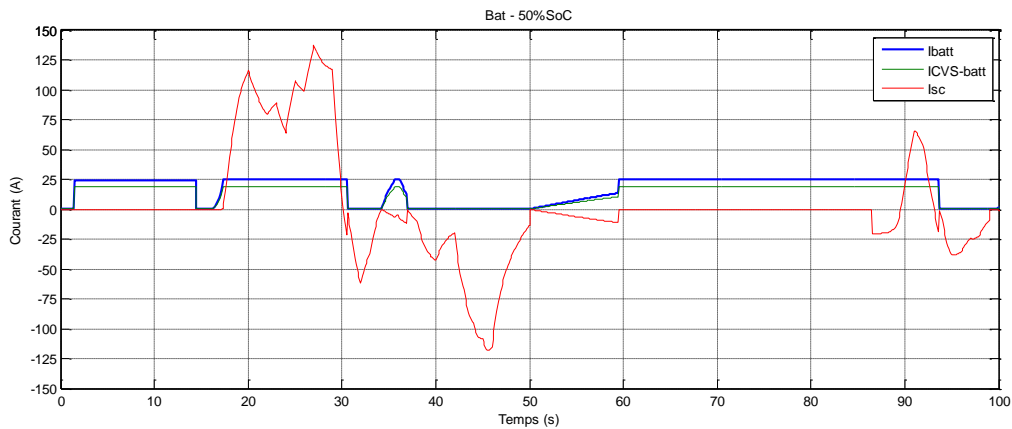


Figure 131 : Evolution des courants selon la stratégie SBatt ($I_{Batt_Max} = 25A$)

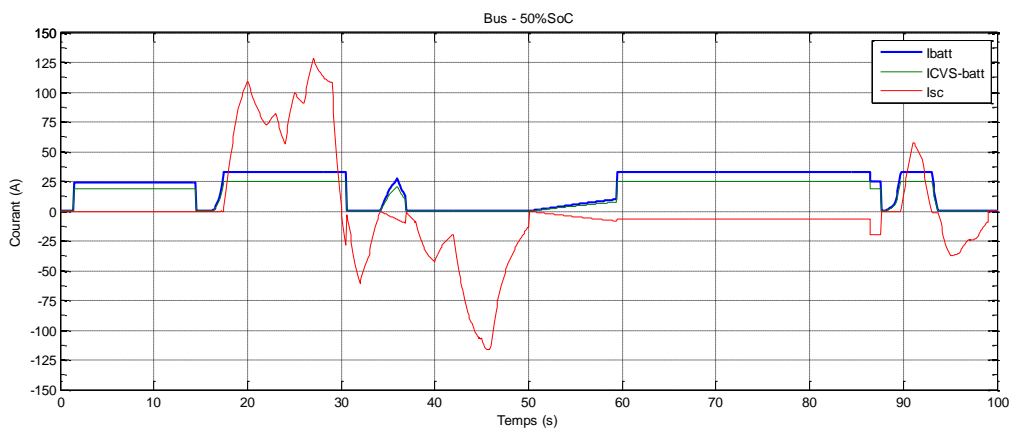


Figure 132 : Evolution des courants selon la stratégie SCVS ($I_{CVS_Batt_Max} = 25A$)

Rappelons que dans la stratégie **SCVS** nous limitons le courant sur le bus DC et à cause de la tension DC constante, la puissance demandée à la batterie est limitée. La faible variation de la tension de batterie implique que le courant de la batterie soit limité.

Comme ce pack de SC est parfaitement adapté au courant max de la batterie, la simulation d'une journée entière de 8 heures nous montre qu'il n'y a pas de récupération d'énergie dans la batterie. Le pack de SC est assez bien dimensionné pour jouer le rôle de buffer d'énergie entre la batterie et la charge. Du coup, si nous représentons le courant efficace (calculé sur la phase de collecte d'un seul cycle Artemis) en fonction du temps (ou de l'évolution de l'état de charge de la batterie) nous constatons qu'il y a très peu de variation des courants efficaces dans la batterie, les supercondensateurs et du courant I_{CVS_Batt} , pour les deux stratégies :

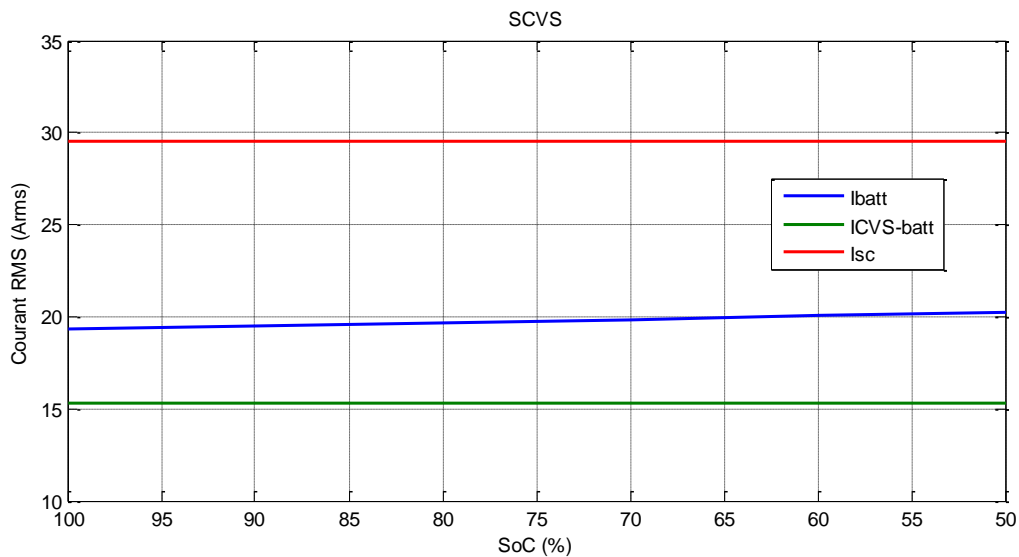


Figure 133 : Evolution des courants efficaces tout au long d'un cycle journalier (SCVS, $I_{CVS_Batt_Max} = 25A$)

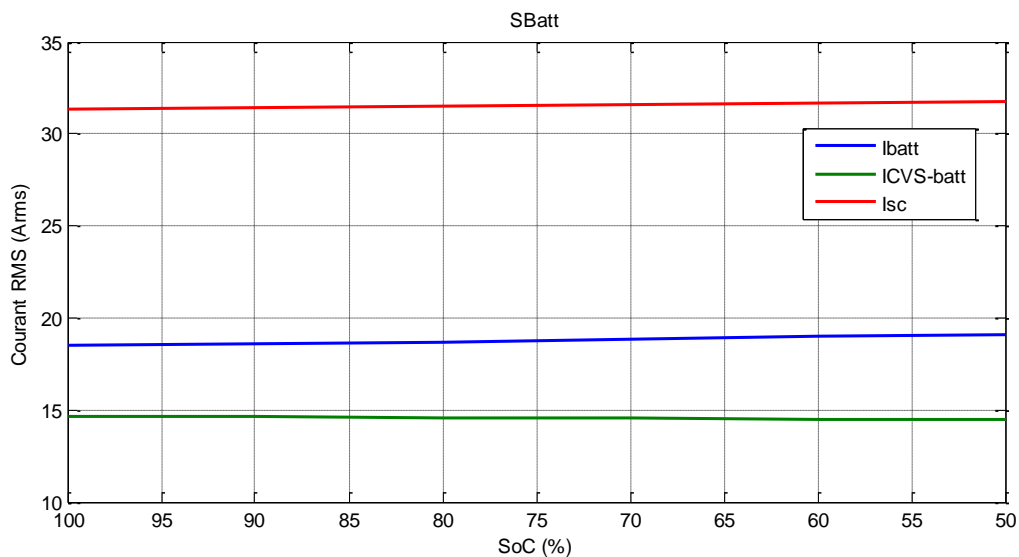


Figure 134 : Evolution des courants efficaces tout au long d'un cycle journalier (SBatt, $I_{Batt_Max} = 25A$)

Sur la Figure 133 et la Figure 134, la légère augmentation du courant de la batterie est due à la diminution de la tension de la batterie pour la stratégie **SCVS** et à la recharge des supercondensateurs par la batterie dans le cas **SBatt**. Cela dénote une utilisation des SC différente pour les deux stratégies.

Si le pack de supercondensateurs est, pour différentes raisons, sous-dimensionné, ou si le courant maximal dans la batterie n'est pas bien adapté au pack supercondensateurs, la batterie devra accepter ou fournir des courants importants. Autrement dit, si nous travaillons dans une zone qui n'est pas optimale, le courant efficace dans la batterie va augmenter. Afin de mettre en évidence ce constat, nous avons simulé la BOM avec un courant maximal de 70A. Les résultats des simulations sont illustrés dans les figures suivantes. Nous constatons que les stratégies se comportent de la même manière, dans le sens de l'augmentation du courant efficace avec la diminution de l'état de charge.

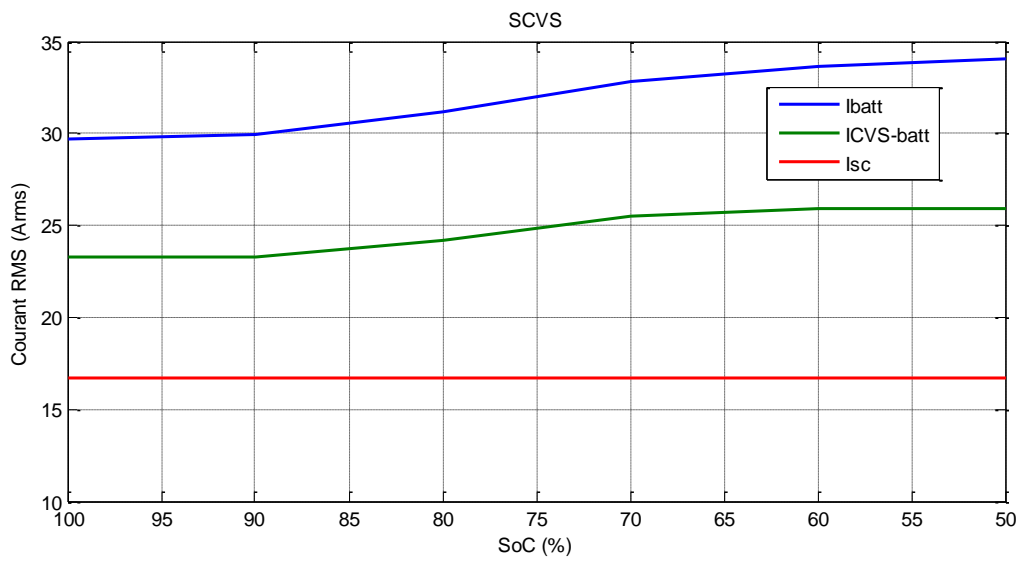


Figure 135: Evolution des courants efficaces tout au long d'un cycle journalier (SCVS, ICVS_Batt_Max = 70)

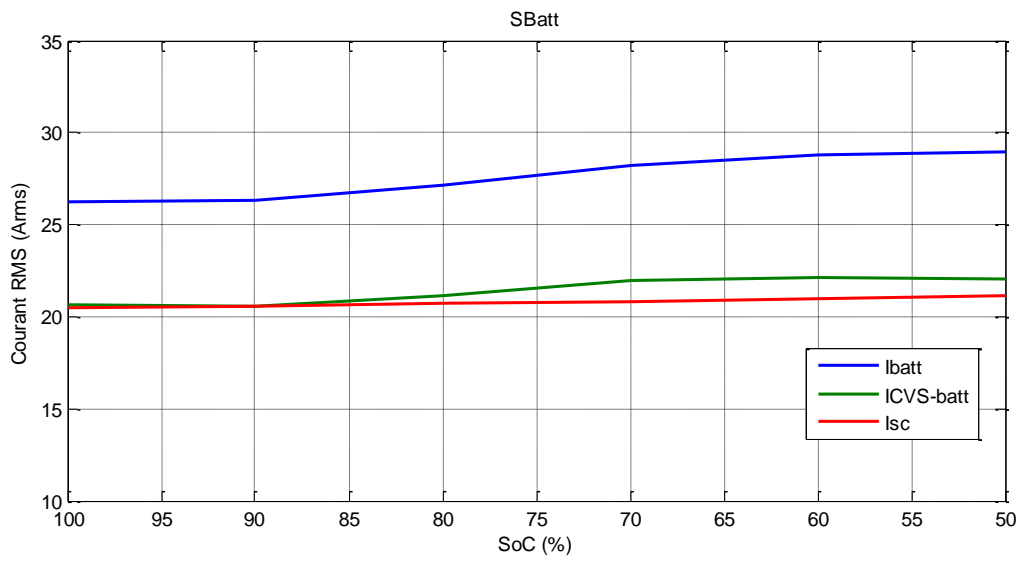


Figure 136: Evolution des courants efficaces tout au long d'un cycle journalier (SBatt, IBatt_Max = 70A)

Pour représenter l'évolution du courant efficace de la batterie, il faut un graphique multi-dimension. Afin de simplifier cette représentation, nous avons illustré sur la Figure 137 et Figure 138, le courant efficace en fonction du courant maximal dans la batterie. Les autres « dimensions », paramètres influents, sont la taille du pack de supercondensateurs, l'état de charge et le type de stratégie :

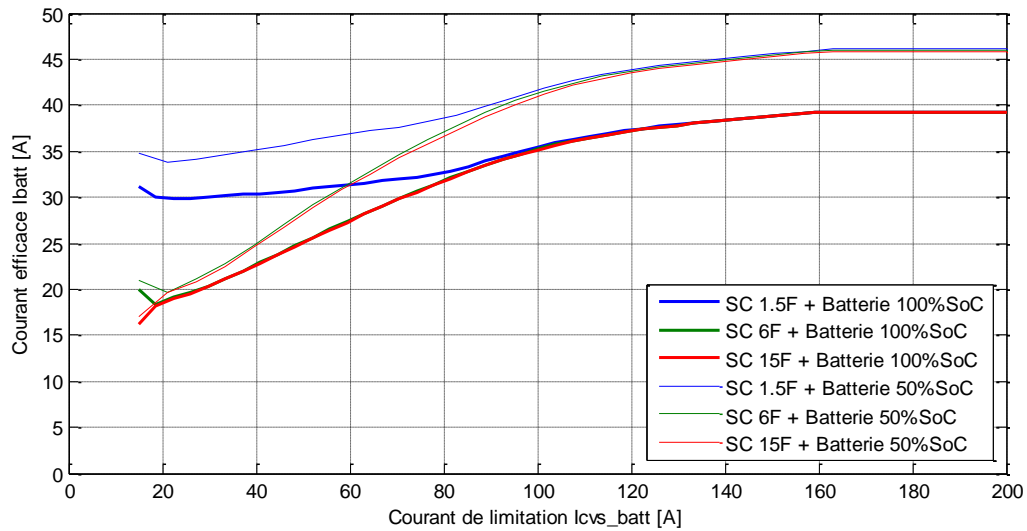


Figure 137 Courant efficace dans les batteries (stratégie SCVS)

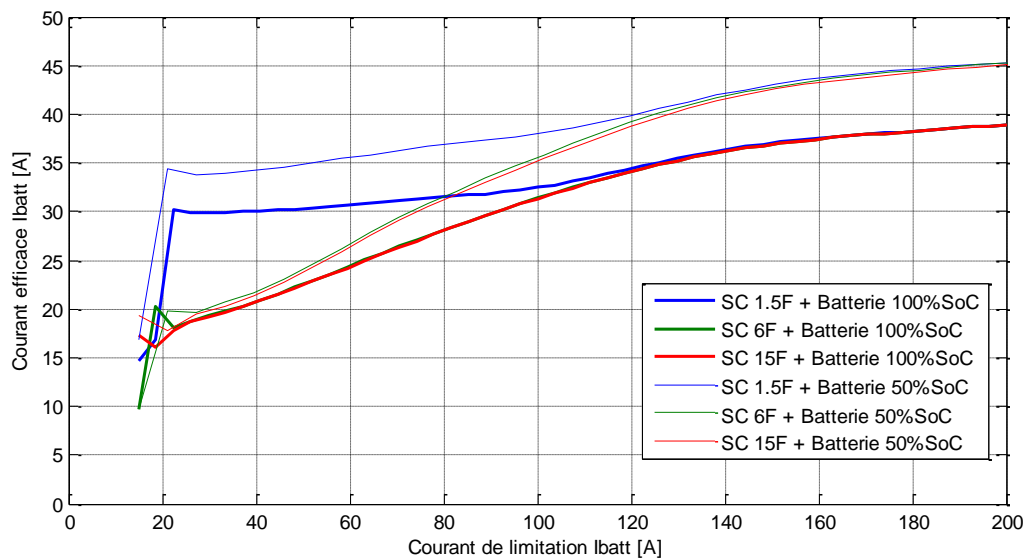


Figure 138 Courant efficace dans les batteries (stratégie SBatt)

L'influence des mêmes paramètres sur le courant efficace des supercondensateurs est illustrée dans les figures suivantes :

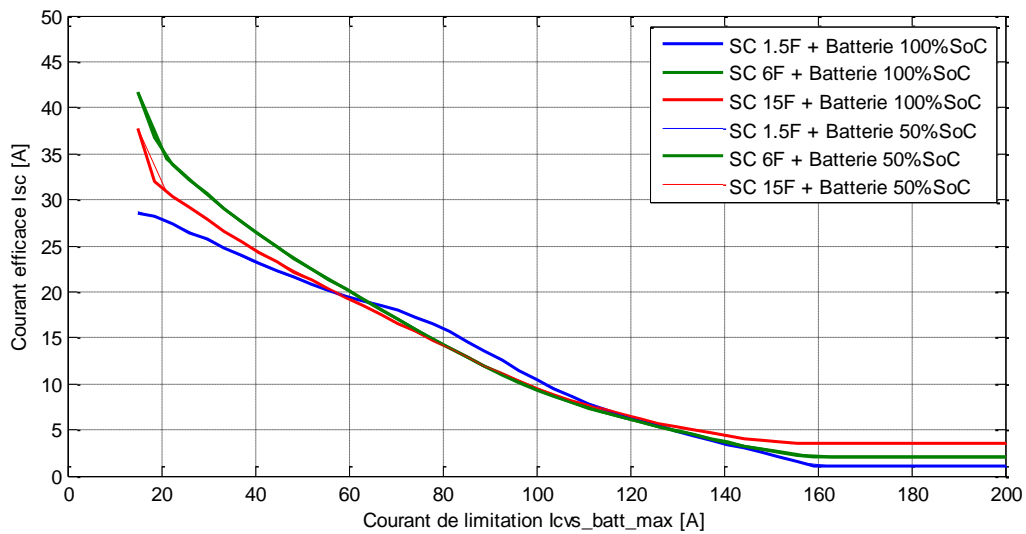


Figure 139 Courant efficace dans les supercondensateurs (stratégie SCVS)

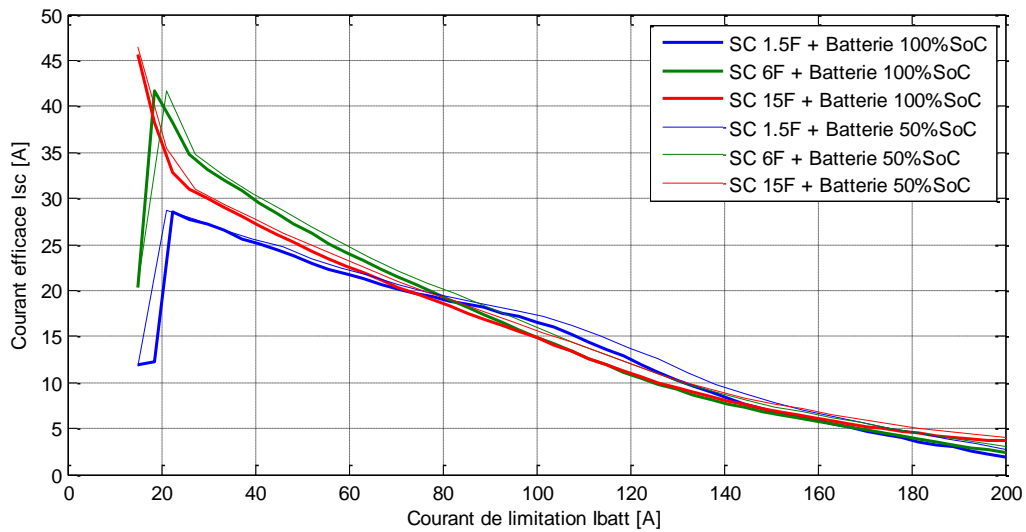


Figure 140 Courant efficace dans les supercondensateurs (stratégie SBatt)

Nous observons que les deux stratégies se comportent de la même manière. Pour un fonctionnement optimal (zone 2), le paramètre le plus important est la taille du pack SC. L'état de charge influence faiblement le courant efficace dans la batterie et surtout quand le pack SC est surdimensionné (ou quand le courant de limitation est grand)

Annexe 6 : Puncher 4x2 de PVI



puncher

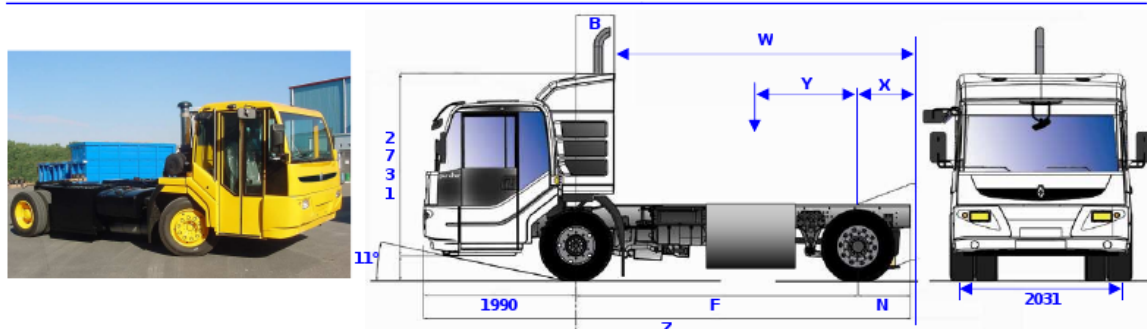
280.20 Bimode - BOM



PORTEUR SOLO
P.T.A.C.: 20 t

P.T.R.A.: 0t

PUNCHER Bimode - Partenariat PVI
Largeur HT 2,36 m (disponible en largeur 2,50 m)
CABINE COURTE
SUSPENSION ARRIERE PNEUMATIQUE



POIDS

EMPATTEMENT		3,900*
PTAC	kg	20 000
Charge totale	kg	9 430
Poids châssis cabine (avec batteries de traction)	kg	10 570
Répartition AV (avec batteries de traction)	kg	5 640
Répartition AR (avec batteries de traction)	kg	4 930
charge maxi essieu AV	kg	7 810
charge maxi essieu AR	kg	12 760

DIMENSIONS

EMPATTEMENT		3,900*
Longueur carrossable Maxi (W)	mm	7 105
Longueur carrossable Mini (W)	mm	0
Porte à faux arrière Maxi (X)	mm	3 685
Porte à faux arrière Mini (X)	mm	640
C. Gravité de la charge Mini (Y)	mm	0
C. Gravité de la charge Maxi (Y)	mm	0
Longueur véhicule Maxi (Z)	mm	9 575
Longueur véhicule Mini (Z)	mm	6 530
Entrée cabine (B) - cote à valider	mm	950
Empattement (F)	mm	3 900*
Porte à faux AR châssis cab (N)	mm	640
Long totale châssis cab (A)	mm	6 530
Haut du châssis à vide (H2) avec pneum série	mm	1 015
Haut du châssis en charge avec pneum série (H2)	mm	975
Haut pavillon/sol à vide (O)	mm	2 731
Porte à faux avant (H)	mm	1 990
Largeur cabine aux ailes	mm	2 360
Voie avant (V1)	mm	2 031
Voie arrière	mm	1 753
Largeur aux roues arrière	mm	2 360
Garde au sol avant	mm	200
Garde au sol arrière	mm	130
Largeur du cadre à l'avant	mm	800
Largeur du cadre à l'arrière	mm	800
Rayon de braquage hors tout	mm	8 080

*empattement minimum à confirmer selon dimensionnement batteries de traction au moment de la pré-étude de faisabilité et de la définition de l'autonomie requise en mode "zéro émission".

Date d'édition : 20 Novembre 2006 - Renault Trucks / PVI

1/3



puncher



280.20 Bimode - BOM

MOTEUR DXI 7

Puissance maximum : 206 kW (280 ch) à 2300 tr/mn.

Couple maximum : 1050 Nm de 1200 à 1700 tr/mn.

Puissances fiscales : 19 cv.

Diesel 6 cylindres en ligne - 4 soupapes par cylindre - Distribution arrière.
Injection directe haute pression COMMON RAIL 1700 bars.
Alésage 108 mm - course 130 mm - Cylindrée 7,2 litres.
Suralimenté par turbo compresseur sur échappement avec refroidissement de l'air d'admission par radiateur air-air.
Sens de rotation (vue côté BV) : anti-horaire.
Niveau de dépollution CEE EURO 4 (2001 / 72b1).

Système de post-traitement SCR à injection d'AdBlue piloté électroniquement.

Liquide de refroidissement : antigel - 25 degrés C.
Niveau sonore du véhicule à 80 dB(A).

EQUIPEMENT MOTEUR

Régulateur électronique de régime ralenti.

Démarrage à froid -15 degrés.

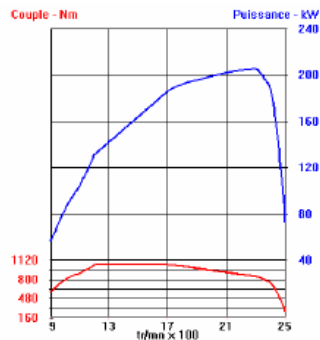
Ralentisseur sur échappement.

Prise de mouvement arrière moteur :

Sortie : plateau DIN 100. Entraînement continu. Sens de rotation moteur.

Couple maxi : 600 Nm de 800 à 1200 tr/mn

Rapport : 1 / 1



EMBRAYAGE

Embrayage monodisque,
Commande hydraulique et assistance pneumatique,
Rattrapage de jeu automatique

BOÎTE DE VITESSES

Boîte de vitesses ZF 16S109
8 vitesses avant et 1 marche arrière

PRISE DE MOUVEMENT

Prise arrière BV spécifiée par PVI selon nomenclature ZF dédiée pour entrée de la cinématique en mode électrique.

DIRECTION

Boîtier à assistance hydraulique incorporée à démultiplication variable.

PONT ARRIERE

P 1395 ou semblable
A double réduction par couple conique et réducteurs dans les moyeux.
Couple à figer par PVI pour utilisation en mode électrique.

PNEUS ET ROUES

MICHELIN 315/60 R 22.5 XZU sur essieu

MICHELIN 275/70 R 22.5 XZU sur pont

Sans roue de secours.

OPTIONS

- Roue de secours en fixation provisoire.
- Roue de secours en fixation provisoire avec cric.

FREINAGE

Frein de service :

Système de freinage électropneumatique, à deux circuits indépendants, géré par électronique type EBS 5 (Electronic Braking System).
Freinage disques sur essieu, tambours sur pont.
Gestion électronique de la production d'air par APM (Air Product Management) :
Dessiccateur à cartouche, optimisé par maintenance préventive.
Compresseur d'air bicylindre (720 cm³).
Sans dispositif de freinage de remorque.

EBS :

- Système d'anti-blocage des roues (ABS).
- Drag torque contrôle (Contrôle du couple lors d'une phase de rétrogradage).
- Gestion de l'engagement du différentiel à vitesse <10 km/h.
- Essai de traction d'attelage (si remorquant).
- Assistance au freinage d'urgence.
- Alerte performance de freinage.
- Harmonisation du freinage du tracteur et de la remorque (si remorquant).
- Couplage des ralentisseurs et des freins de services (si équipé).
- Anti-patinage des roues (ASR).
- Assistance au démarrage en côte (Hill Start Aid) si équipé.
- Équilibrage usure plaquettes.

Frein de stationnement :

A commande pneumatique, immobilisation assurée par cylindres à ressort.
Alerte d'oubli de frein de parking.

Frein de secours :

Assuré par l'indépendance des circuits du dispositif principal.

Réglage :

Rattrapage automatique du jeu des plaquettes.

CABINE

Hauteur d'accès en ordre de marche d'environ 420 mm (selon carrossage)

Porte bus côté passager avec baie coulissante

Basculable à 40° par vérin hydraulique
Tableau de bord avec volant réglable en hauteur et en inclinaison
Siège conducteur suspendu pneumatique avec coussin réglable au niveau des lombaires pour soutenir le dos du conducteur.
3 places (2 passagers à droite sur banquette)

Sellerie tissu

Ceintures de sécurité

1 rétroviseur d'accostage et 1 grand angle côté droit

Rétroviseurs dégivrants à réglage électrique

Chauffage, ventilation par air pulsé à débit variable

Protection par cataphorèse

Couleur blanc glacier RENAULT TRUCKS

Glace arrière

Vitres teintées, électrique sur porte conducteur

Toit ouvrant

Coffres de rangement

Poignées intérieures de maintien, poignée droite d'accès en cabine

Patères en cabine

Autoradio

Compteur horaire



puncher

280.20 Bimode - BOM



CHASSIS

Section des longerons 300 x 80 x 7 mm
Teinte châssis : gris RENAULT TRUCKS

SUSPENSION

A l'avant :

ressorts à lames paraboliques, amortisseurs télescopiques, barre stabilisatrice.

A l'arrière :

A bras tirés, pneumatique à 2 coussins, barre stabilisatrice
Amortisseurs télescopiques.

RESERVOIR A COMBUSTIBLE

Réservoir principal acier capacité : 215 litres (soit 180 kg de gazole).
Sans réchauffeur de gazole.

OPTIONS

- Réchauffeur de gazole électrique sur filtre.

EQUIPEMENT ELECTRIQUE

Tension 24 volts assurée par 2 batteries 180 Ah.
Alternateur 100 A.
Prise carrossier de prédisposition à la norme NF 1501.

EQUIPEMENT STANDARD

Echappement vertical
Anneau de remorquage avant
Régulation du régime moteur en travail BOM
Bouchon à clé
Lot de bord (triangle, extincteur cabine, barre)
Filtre à air arrière cabine, aspiration haute

OPTIONS

- Bruiteur de marche arrière.
- Commande de variation d'altitude du châssis par interrupteur au tableau de bord.
En 4x2 fonction monte et baisse, en 6x2 abaissement de la suspension

FONCTIONNEMENT EN MODE ELECTRIQUE

FONCTIONNEMENT

Passage du mode thermique au mode électrique à l'arrêt, par action sur un bouton au tableau de bord.
Sélection d'un rapport BV pour roulage en mode électrique.
Avancement et entraînement des auxiliaires sur batteries de traction en mode électrique (moteur thermique arrêté).

TRACTION

Moteur de traction à courant alternatif asynchrone 400 V.
Puissance 50 kW environ.
Variateur à contrôle vectoriel de flux. Capacité 90 kW environ, pour gérer le couple au démarrage.

AUXILIAIRES

Moteur d'entraînement des auxiliaires à courant alternatif asynchrone 400 V.
Puissance 10 kW environ.
Variateur à contrôle vectoriel de flux. Capacité 10 kW environ.
Entraînement direct :
- d'un compresseur à spirale dimensionné pour usage urbain châssis Puncher BOM (suspensions pneumatiques & freinage suivant standard EBS).
- d'une pompe hydraulique haute pression pour assistance de direction.

ENTRAINEMENT BOM

Moteur d'entraînement de la carrosserie BOM +LC à courant alternatif asynchrone 400 V.
Puissance 12 kW environ.
Variateur à contrôle vectoriel de flux. Capacité 12 à 15 kW environ.
Montage et raccordement à la charge du carrossier sur préconisations PVI.

ALIMENTATION ELECTRIQUE

Alimentation de l'ensemble du contrôle-commande châssis en courant continu par convertisseur statique 550VAC/24VDC.

CONTROLE PUISSANCE

L'ensemble des organes électriques de puissance est regroupé dans une armoire électrique arrière cabine sur cadre spécifique.
Armoire aérée par ventilation forcée.

REFROIDISSEMENT

Variateurs refroidis par circuit hydraulique + échangeur air/eau indépendant du circuit châssis d'origine.

CHAUFFAGE

Circuit de chauffage / désembuage cabine alimenté par chaudière autonome type WEBASTO.
By-pass sur circuit du châssis d'origine.
Commande au tableau de bord.

CHARGEUR BATTERIES

Chargeur de batteries 380V de fourniture PVI.
Chargeur embarqué ou à poste fixe (optimisation de la charge utile).

BATTERIES DE TRACTION

Batteries non fournies avec le châssis.
Batteries de traction de type plomb/gel, fermées.
Tension nominale d'utilisation 552 V environ.
Capacité 180 Ah.
Soit 92 blocs de 6V (poids approximatif 32 kg par bloc, hors supports sur châssis).
Batteries sans entretien, données pour 700 cycles à 75% de décharge

- Autre type de batteries de traction (selon conditions d'exploitation du châssis et autonomie requise en mode "zéro émission").

Annexe 7 : Renault GR191 BOM



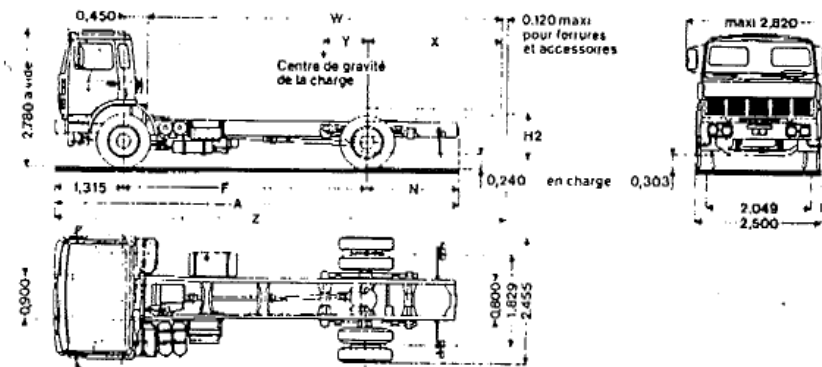
GR 191B BOM HB 19 BOM

FRANCE

Date : mai 1979

CHASSIS PORTEUR POUR BOM
P.T.A.C. : 19 t
Moteur : 185 ch DIN

SCHEMA B49



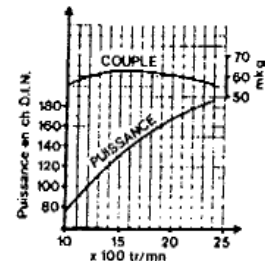
Code mécano : 7371

EMPATTEMENT		NORMAL	LONG
Cabine de série		Courte	Courte
POIDS (t)	P.T.A.C	19,000	19,000
	Charge totale (1)	13,445	13,365
	Châssis cabine (1)	5,555	5,635
	Répartition		
	AV	3,430	3,450
	AR	2,125	2,185
Limite maxi par essieu	AV	6,500	6,500
	AR	13,000	13,000
DIMENSIONS (m)	A	6,555	7,905
	F	4,000	4,800
	H 3 à vide	1,148	1,153
	H 3 en charge	0,983	0,986
	N	1,240	1,790
	W	6,350	7,150
	X	2,800	2,800
	Z	8,115	8,915
Diamètre de braquage Hors Tout		18,000	18,500

NOTA (1) - Le poids du châssis cabine est un poids moyen indicatif. Il s'entend avec les pleins (réservoir 150 l), mais sans roue de secours, sans conducteur ni passager.

MOTEUR (type MID 06.20.30)

Diesel 6 cylindres verticaux en ligne - 4 temps
Injection directe
Alésage : 120 mm - Course : 130 mm
Cylindrée : 8,82 litres
Puissance fiscale : 24 CV
Puissance maxi DIN 185 ch (136 kW) à 2400 tr/min
Couple maxi DIN 62 mkg (60,8 m daN) à 1600 tr/min
Capacité en huile : 20 litres
Capacité en eau du circuit de refroidissement : 30 litres
Une culasse par cylindre - Chemises amovibles - Régulateur - toutes vitesses - Filtre à huile deux cartouches - Echangeur de température d'huile - Régulateur de température d'eau par thermostat - Filtre d'air à bain d'huile - Compresseur d'air entraîné par la distribution et refroidi par eau.



Doc. 302 F - Ed. 1/79 n. 1

GR 191B BOM HB 19 BOM

EMBRAYAGE - type 380 DB 1500

Monodisque fonctionnant à sec. Commande hydraulique et assistance pneumatique extérieures à la cloche d'embrayage.

BOITE DE VITESSES - type BDSL 021

6 vitesses AV synchronisées et 1 AR toutes silencieuses à denture hélicoïdale en prise constante. Capacité en huile 13 litres.

Rapports de démultiplication :

1 ^{re}	2 ^{me}	3 ^{me}	4 ^{me}	5 ^{me}	6 ^{me}	AR
7,51	4,20	2,60	1,63	1	0,75	6,82

Options - Sur demande

- Prise de mouvement à commande pneumatique avec tambour lumineux d'enclenchement (+ 10 kg) rapport 1 - couple maxi transmissible 36 mkg sens de rotation inverse moteur
 - Prise de mouvement grande puissance NMV 80 rapport 1,03 - couple maxi transmissible 60 mkg sens de rotation moteur
- Cette prise entraîne obligatoirement le montage d'une boîte de vitesses ZF S 6 80 avec la 6^{me} vitesse bloquée.

Rapports de démultiplication :

1 ^{re}	2 ^{me}	3 ^{me}	4 ^{me}	5 ^{me}	AR
6,70	3,86	2,33	1,44	1	6,31

- Débrayage automatique de la prise NMV 80 à 1200 tr/min
- Transmission automatique Allison avec convertisseur de couple (type MT 643) 4 vitesses AV et 1 vitesse AR

Rapports de démultiplication :

1 ^{re}	2 ^{me}	3 ^{me}	4 ^{me}	AR
3,58	2,09	1,39	1	5,67

PONT ARRIERE - type P 1332 B

Double réduction par couple conique à denture hypocyde et par réducteur dans les moyeux. Ensemble différentiel démontable par l'AV. Couples possibles :
- 10x41 - Réduction moyeux 1/2 rapport total 8,20 avec boîte BDSL
- 10x41 - Réduction moyeux 1,2 - rapport total 6,31 avec boîte ZF et transmission Allison
Capacité en huile 12,25 litres + 2,25 litres par réducteur.

- Option - Sur demande
- Blocage de différentiel

CABINE AVANCÉE BASCULABLE

Basculement 52° double verrouillage et voyant de sécurité. Large visibilité. Lunettes AR, glaces de custode et rétroviseurs extérieurs. Pare-brise panoramique, 4 projecteurs. Accès facile de chaque côté, marche-pieds antidérapants et deux poignées montées.

POSTE DE CONDUITE

Siège conducteur et passager réglables. Chauffage, dégivrage et ventilation avec buses orientables.
Insonorisant et revêtement contribuant au confort et à l'isolation.
Tableau de bord regroupant tous les appareils de contrôle, commandes et voyants témoins, notamment : compteur kilométrique et totalisateur, compte-tours, signal de détresse, etc.
Nombreux aménagements assurant le confort, tels : alarme cigare, cendriers, boîte à gants, fourre-tout avec couvercle fermant à clé, dossier au dessus du pare-brise.

Options - Sur demande

- Siège conducteur suspendu réglable (+ 13 kg)
- Banquette 2 places avec accoudoir côté conducteur (+ 15 kg)

CHASSIS

Longerons en tôle d'acier enroulée en forme de U entretoisés par des traverses rivées.
Section des longerons : 300 x 85 x 7 mm
Chape de remorquage AV.

ESSIEU AVANT - type E 8 A 41

SUSPENSION

Par ressorts à lames semi-elliptiques simples à l'AV avec ressorts auxiliaires à l'AR. Amortisseurs hydrauliques à l'AV. Stabilisateur par barre de torsion à l'AV et à l'AR.

Option - Sur demande

- Ressorts AR asymétriques.

DIRECTION - type D 80 RS

Vis et écrou à déplacement sur billes, avec assistance hydraulique.

FREINAGE

Frein principal :

A commande pneumatique. A double circuit conformément aux normes de la C.E.E. Le frein de secours est assuré par l'indépendance des circuits AV et AR.

Frein de parking :

A commande manuelle assistée pneumatiquement agissant sur deux cylindres "à verrou" AR.

Diamètre des tambours

AV : 414 mm - AR : 414 mm.

Surface de freinage des garnitures :

AV : 2025 cm² - AR : 2800 cm².

Total : 4 825 cm².

VALENTISSEUR

Option - Sur demande

- Sur échappement à commande pneumatique (sauf avec transmission automatique)

EQUIPEMENT ELECTRIQUE

24 Volt - 2 batteries 12 V - 120 Ah
Alternateur 35 A - Interrupteur général

RÉSERVOIR A COMBUSTIBLE

150 litres à droite

PNEUS ET ROUES

8 pneumatiques 12-22,5 X ZZ "SC" ou 12-22,5 SP "SC" jumalés à l'AR.
Roues disques 22,5-8,25 - 10 - 154 M 22

Options - Sur demande

- Roue de secours en vrac
- Pneumatiques F 20
- Pneumatiques E 22,5 Pistoie X

EQUIPEMENT STANDARD

Trousse d'outillage et cric hydraulique.

EQUIPEMENTS DIVERS

Options - Sur demande.

- Echappement vertical derrière cabine
- Adaptation pour prise de force à l'AV du moteur. Couple maxi transmissible : 50 mkg (49,5 m.d.N) à 1 500 tr/min
- Dégagement du longeron droit.

PERFORMANCES

Vitesses en km/h au régime maxi de 2400 tr/min

Avec boîte BDSL 021

Vitesses	Rapport de pont 1 à 8,20	
	Pneus 12-22,5	Pneus F 20
1 ^{re}	7,7	8
2 ^{me}	13,8	14,3
3 ^{me}	22,3	23,3
4 ^{me}	35,6	37,2
5 ^{me}	58,1	60,2
6 ^{me}	77,5	80,3
AR	8,5	8,8

Avec boîte ZF S 6 80

Vitesses	Rapport de pont 1 à 6,31	
	Pneus 12-22,5	Pneus F 20
1 ^{re}	11,2	11,7
2 ^{me}	18,5	20,3
3 ^{me}	32,4	33,6
4 ^{me}	52,4	54,3
5 ^{me}	75,5	78,2
AR	11,9	12,3

Avec transmission automatique Allison et convertisseur de couple.

Vitesses	Rapport de pont 1 à 8,31	
	Pneus 12-22,5	Pneus F 20
1 ^{re}	11,5 à 21,1	11,9 à 21,8
2 ^{me}	19,7 à 36,1	20,5 à 37,4
3 ^{me}	3,39	54,3
4 ^{me}	1	75,5
5 ^{me}	1	78,2
AR	13,3	13,8

POULIE ALT Ø 72,5 mm
POULIE MOT Ø 225 mm

NOTA: Le Constructeur se réserve le droit de modifier les caractéristiques ci-dessus sans préavis. Les adaptations ne pourront être effectuées qu'à partir de nos plans.

RENAULT VEHICULES INDUSTRIELS
Société Anonyme au capital de F. 455 625 000
Siège Social: 69007 LYON, 30 Quai Claude Bernard
Siret: 954 506 077 00013
R.C. LYON 9 954 506 077

RENAULT
Véhicules Industriels

Annexe 8 : Datasheet Energys

ARMASAFE *plus*™



Quite Possibly The World's Best Battery For Combat and Tactical Vehicles

- High starting power
- Long shelf life
- Maintenance free
- Longer life
- Environmentally safe
- Lower life-cycle cost
- Deep reserve capacity
- Air transportable

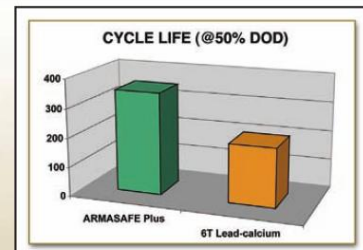
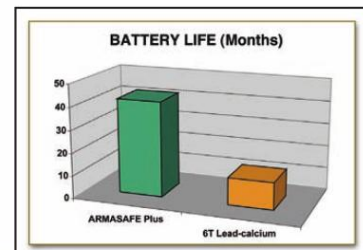
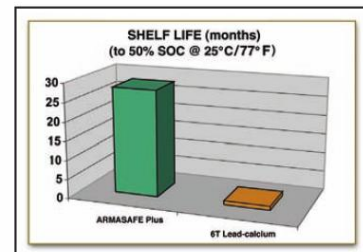
Qualified/tested to: **MIL-PRF-32143**

NSN 6140-01-485-1472
P/N 9750N7025

COMPARISON OF BATTERY SPECIFICATIONS

ARMASAFE <i>plus</i>™ /6TAGM	ORDINARY MILITARY LEAD CALCIUM BATTERIES/6TMF
<ul style="list-style-type: none"> • 12 Volts • CCA - 1225 • Reserve capacity - 240 mins • Capacity - 120 Ah C₂₀ • Usable reserve - 70% DoD • Shelf life 30 months @ 25°C/77°F • Battery type - lead acid • Technology - VRLA-AGM*, TPPL* • Cycle life - 360 • Life (cradle to grave) - 48-54 months • Internal resistance - 0.002 Ohms • Transport class - Non-spillable • Weight - 88 pounds (40kg) • Size - NATO 6T • Deep cycle life - 120 	<ul style="list-style-type: none"> • 12 Volts • CCA - 725 • Reserve capacity - 200 mins • Capacity - 120 Ah C₂₀ • Usable reserve - 30% DoD • Shelf life 3 months • Battery type - lead acid • Technology - Flooded, lead calcium • Cycle life - 235 • Life (cradle to grave) - 13 months • Internal resistance - 0.009 Ohms • Transport class - Hazardous • Weight - 75 pounds (34kg) • Size - NATO 6T

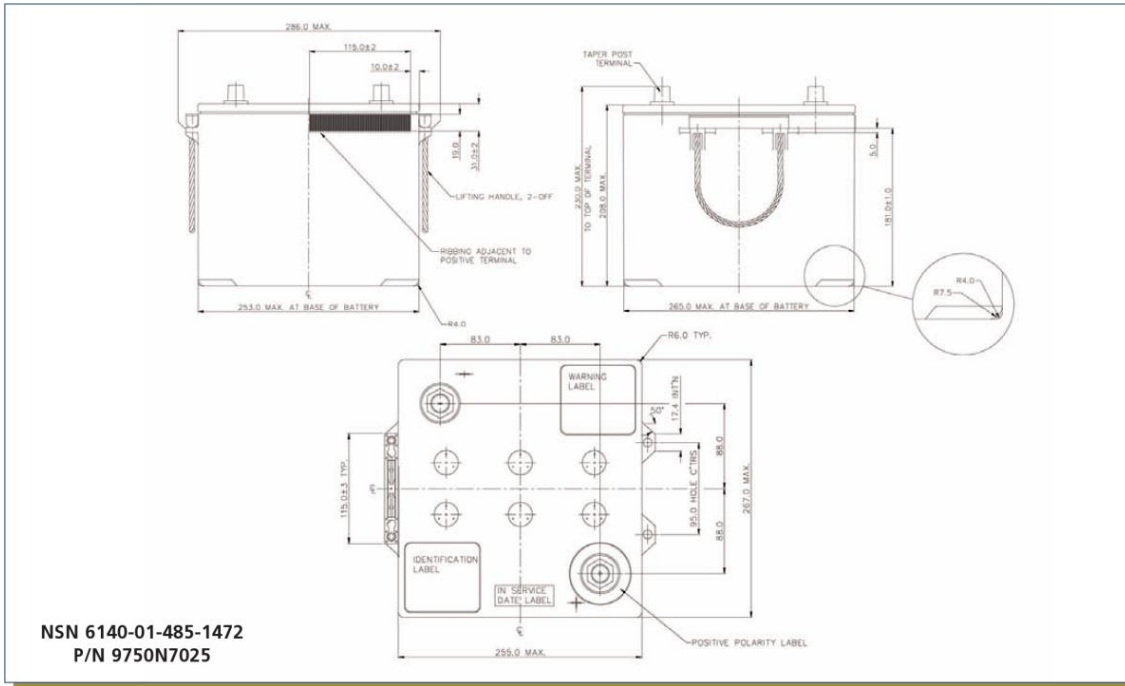
*VRLA - Valve regulated lead acid
*AGM - Absorbed glass mat
*TPPL - Thin Plate Pure Lead



877.485.1472 • www.hawkerplus.com



DIMENSIONS



Wherever in the world you do business, EnerSys® is with you all the way. With manufacturing facilities strategically located in Asia, Europe, and North America, a strong global sales and support team, and a reputation for world-leading technology, we ensure that our customers will have a reliable supply of high quality products. We are committed to delivering the best solutions for your aerospace and defense needs.



Aerospace & Defense

2366 Bernville Road • Reading, PA 19605, USA • Tel. (610) 208-1991 • Fax (610) 208-1630
email: aerodefense.sales@enersys.com • www.enersys.com/defense

These batteries and associated products are subject to the regulations of the International Traffic in Arms Regulations (ITAR) contained in 22 C.F.R. Parts 120-130. Any export or re-export of these products require a prior written export authorization from the U.S. Department of State. It is the responsibility of the purchasing or receiving party to comply with all requirements of the ITAR, including ensuring that all required export authorizations are in place prior to exportation or re-exportation.

©2010 EnerSys. All rights reserved. Trademarks and logos are the property of EnerSys and its affiliates unless otherwise noted. Subject to revisions without prior notice. E.&O.E. EnerSys is ISO 9001:2000 and ISO 14000 registered.

US-A&D-002 08/10

877.485.1472 • www.hawkeraplus.com