



HAL
open science

Résultats expérimentaux sur la durée de vie des batteries au plomb associées aux supercondensateurs

Bogdan Vulturescu, Christophe Forgez

► **To cite this version:**

Bogdan Vulturescu, Christophe Forgez. Résultats expérimentaux sur la durée de vie des batteries au plomb associées aux supercondensateurs. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065428

HAL Id: hal-01065428

<https://hal.science/hal-01065428>

Submitted on 18 Sep 2014

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

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

Résultats expérimentaux sur la durée de vie des batteries au plomb associées aux supercondensateurs

Bogdan VULTURESCU^a, Christophe FORGEZ^b

^a Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)

^b Université de Technologie de Compiègne (UTC)

RESUME - Parmi les avantages apportés par l'association des supercondensateurs aux batteries, l'augmentation de la durée de vie des batteries est souvent citée, mais très peu explorée de manière expérimentale. Le dispositif expérimental présenté dans cet article a permis le cyclage comparatif de deux packs identiques de batteries au plomb soumises à deux profils de courant différents - issus de la simulation d'une benne à ordures ménagères (BOM) sur un cycle de conduite européen type ARTEMIS. Un profil représente le courant fourni par la BOM alimentée uniquement par une batterie tandis que l'autre représente le courant fourni par la batterie d'une BOM alimentée par une source hybride. Le cyclage montre que la durée de vie des batteries de la source hybride a été améliorée de manière significative grâce à l'association de supercondensateurs.

Mots-clés— source hybride, batterie au plomb, supercondensateurs, durée de vie, cyclage batteries.

1. INTRODUCTION

Les véhicules électriques à batterie représentent une solution parmi d'autres pour une mobilité urbaine propre. Mais, même si elles remplissent les besoins actuels des utilisateurs [1], ces véhicules sont loin d'être parfaits car la batterie «idéale» n'existe pas. En effet, une batterie «idéale» aurait une grande capacité, une excellente puissance massique, un temps de recharge très court, ne poserait pas de problèmes de sécurité et serait à faible coût. Une partie de ces desiderata se trouvent dans certaines technologies de batteries au lithium, mais leur coût reste très élevé. L'article de Gerssen-Gondelach [2] montre que le coût de la batterie au plomb est compétitif avec celui d'une future batterie au lithium faible coût (pour des distances d'environ 200km) si la durée de vie de la batterie au plomb est de 5 ans.

Une réponse technique pourrait être l'association des batteries au plomb avec des supercondensateurs. La source hybride ainsi obtenue tirerait le meilleur de chaque composant : une énergie spécifique satisfaisante, pas très chère, ainsi qu'une puissance massique très intéressante.

Les principaux bénéfices de l'association batteries au plomb – supercondensateurs sont : le filtrage et la limitation du courant délivré par la batterie [3, 4], la modification de la fenêtre de l'état de charge de la batterie [5], l'augmentation de l'autonomie du véhicule [6-8], meilleures performances en basse température [9, 10], l'augmentation de la durée de vie [11, 12].

Ce dernier point est souvent mentionné mais rarement abordé du point de vue expérimental, car le cyclage des batteries prend beaucoup de temps et pose des problèmes d'équivalence entre les conditions de cyclage et la vie réelle des batteries. Les exceptions sont [11] et [12]. Dans [12], Omar propose un test d'endurance pour montrer une augmentation de la durée de vie des batteries de 30% dans un montage passif (supercondensateurs connectés directement aux bornes de la batterie). Dans [11], Angers a cyclé deux packs (identiques). Un premier pack représente la source d'énergie d'un véhicule électrique alimenté uniquement par la batterie tandis que le deuxième pack simule le même véhicule électrique mais alimenté par une source hybride. L'essai n'a pas permis la mise en évidence d'une augmentation significative de la durée de vie des batteries car l'énergie extraite de la source hybride était supérieure à celle extraite du véhicule alimenté uniquement par la batterie. Par conséquent, la batterie de la source hybride a été déchargée plus profondément.

Dans cet article nous proposons une démarche similaire à celle de [11], le cyclage comparatif de deux packs, mais les hypothèses du cyclage sont différentes : les deux packs fournissent la même énergie mais sous un courant différent.

L'objectif principal de l'article est de présenter les hypothèses faites dans la constitution du profil de courant utilisé pour le cyclage journalier de chacun des deux packs, la procédure suivie pendant 18 mois et les résultats expérimentaux concernant la durée de vie des batteries au plomb.

Ces travaux font partie du projet ARCHYBALD financé par l'ANR.

2. DU PROFIL DE MISSION AU PROFIL JOURNALIER EN COURANT

Dans cette section nous allons rappeler brièvement les caractéristiques du véhicule lourd simulé, le profil de mission adopté, la stratégie de management de l'énergie à bord du véhicule et le dimensionnement de la source d'énergie hybride. Ces trois éléments sont étroitement liés dans la définition du profil de courant nécessaire au cyclage des batteries et représentent les hypothèses fortes de la méthodologie de cyclage.

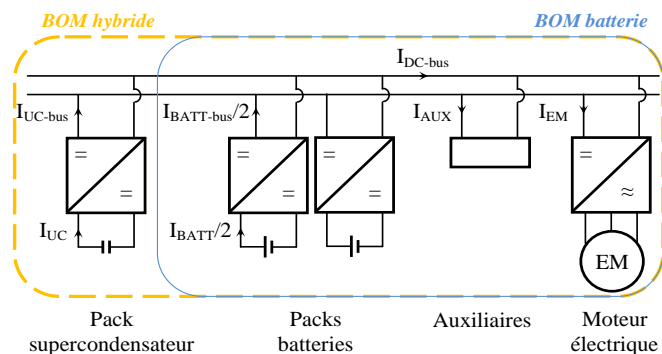


Fig. 1 Schema électrique de principe

2.1. Hypothèses de simulation – profil de courant simulé

La benne à ordures ménagères (BOM) simulée est un véhicule hybride lourd de 20t (PTAC). L'architecture électrique de type hybride série est illustrée dans la Fig.1.

Des modèles simples ont été utilisés dans la modélisation du véhicule sous VEHLIB [13] : une force de résistance à l'avancement constante, rendements constants des convertisseurs électriques, réducteur et transmission mécanique, une cartographie des pertes du moteur triphasé asynchrone. La consommation des auxiliaires, essentiellement le compacteur d'ordures, est également prise en compte. L'originalité dans la modélisation des sources ne provient pas du modèle simple des supercondensateurs (circuit RC) mais elle réside dans le modèle non-linéaire de la batterie au plomb : circuit de Randles non-linéaire et prise en compte de l'acceptabilité en charge.

La modélisation de la BOM a été présentée en détails dans [5] et le modèle de la batterie dans [14]. Les paramètres des modèles sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Paramètres de la BOM simulée

Sous-système	Paramètre	Valeur
Machine électrique	Puissance nominale	50kW (max 90kW)
	Couple maxi	330Nm
	Vitesse nominale	1500tr/min
	Tension nominale	3 x 400V
	Courant nominal	100A
	Rendement (CVS inclus)	92.5%
	Masse	315kg
Pack batterie (2x34 en série)	Tension à vide	442V @100%SoC
	Capacité C10/C1	220Ah/160Ah
	Résistance DC interne	37mΩ
Paramètres constructeur	Masse	2.5t
	Rendement CVS	97%
Pack supercondensateurs (200 en série)	Limites tension	540V/270V
	Capacité	15F
	Résistance DC interne	44mΩ
	Masse	110kg
Paramètres constructeur	Rendement CVS	97%
	Rapport	5.96
Réducteur & transmission méca	Rendement	95%
	Diamètre roues	2 x 56cm
Véhicule	Masse PTAC (vide)	14t (7.5t)
	Surface frontale	6.44m ²
	Coefficient penetration air	0.6
	Résistance à l'avancement	100N/t
	Stratégie énergie	Courant max batterie

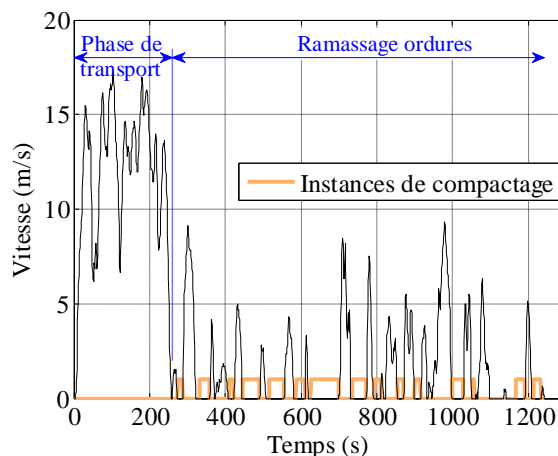


Fig.2 Cycle de conduite pour benne à ordures type ARTEMIS400

Le profil de mission type pour une benne à ordures ménagères à moteur thermique est composé de deux phases : transport et ramassage, comme dans la Fig.2. Dans le cadre du projet nous avons considéré que le transport des ordures se fait en mode diesel-électrique (sans consommation électrique provenant des batteries) et la phase de ramassage en mode tout-électrique. Cette phase est donc déterminante dans le dimensionnement de la source hybride. Le profil journalier est constitué de la répétition de cette phase 24 fois, correspondant à un travail journalier de 8 heures.

La stratégie de partage du flux de puissance (illustrée dans la Fig.3) est basée sur les spécifications suivantes : 1) la batterie régule la tension du bus DC, 2) en traction, le courant fourni par la batterie est limité à une valeur maximale, le reste étant fourni par les supercondensateurs, 3) en freinage-récupération, les supercondensateurs se chargent de manière prioritaire, 4) l'état de charge des supercondensateurs est maintenue constante, à un niveau élevé (par l'énergie récupérée mais aussi par une recharge lente à partir de la batterie, si nécessaire).

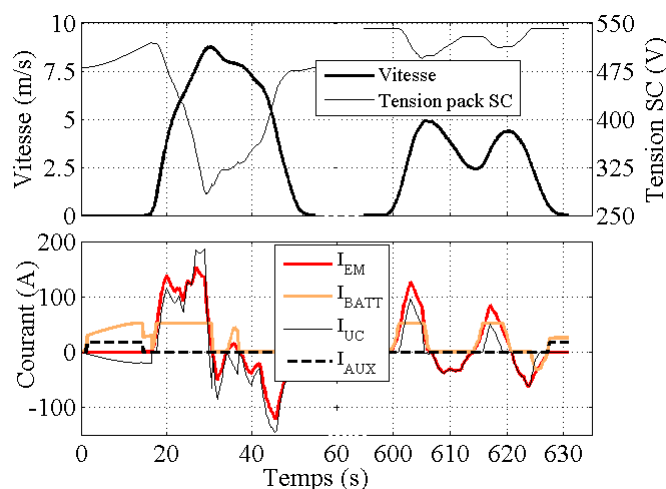


Fig.3 Stratégie de partage du flux de puissance (simulation, SoC₀=50%)

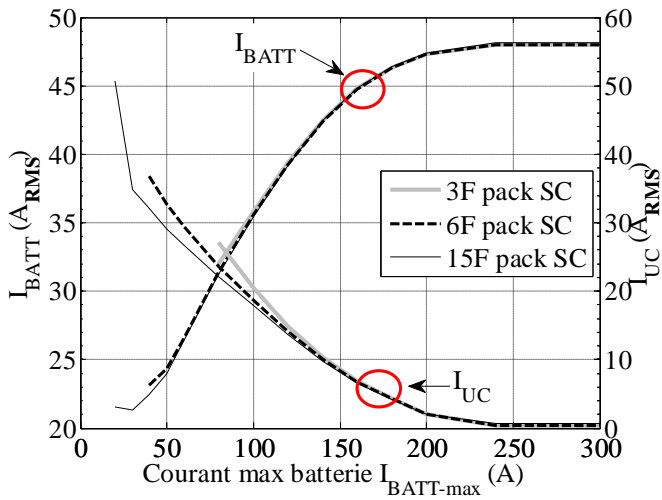


Fig.4 Critères de choix du pack de supercondensateurs

Le dimensionnement des packs batterie et supercondensateurs est issu de simulations de la stratégie de gestion appliquée au profil de mission. La quantité d'énergie consommée de la batterie est grandement influencée par le choix de la fenêtre d'état de charge dans laquelle la batterie travaille, essentiellement à cause de l'acceptabilité en charge d'une batterie au plomb. La durée de vie de la batterie diminue avec l'augmentation du nombre de microcycles de charge-décharge. Ce nombre est fortement diminué par l'utilisation d'une source hybride. Afin de réduire le nombre de microcycles nous avons choisi de minimiser le courant RMS dans la batterie par le biais du courant maximal admissible dans la batterie (Fig.4).

Les résultats de simulation les plus importantes pour le cyclage des batteries concernent l'évolution journalière du courant fourni par la batterie et l'énergie consommée.

Pour la BOM alimentée uniquement par batterie, le pack batterie (appelé dans la suite **pack non-assisté**) ne stocke quasiment pas l'énergie récupérée au freinage lors des 2 premières heures (état de charge initial de 100%), soit les 6 premiers sous-cycles ARTEMIS400. Le courant prend la forme de celui du sous-cycle 1 dans la Fig.5 :

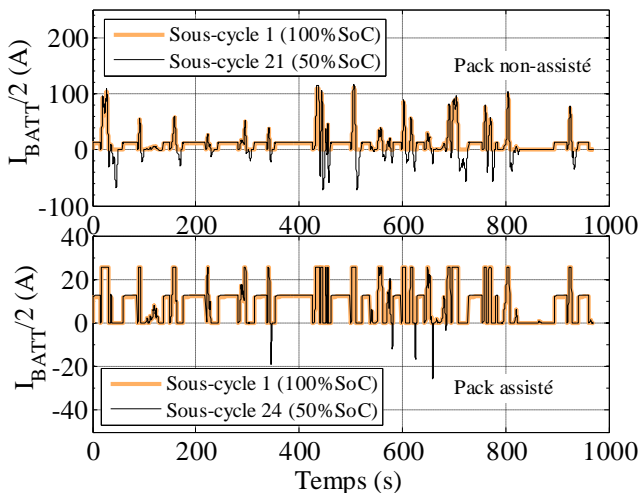


Fig.5 Courant batterie (simulé) pour différents SoC

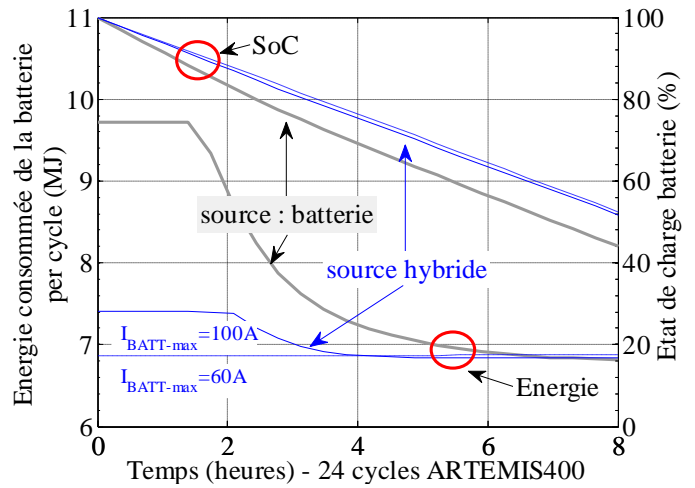


Fig.6 Consommation énergétique journalière

Une fois que l'état de charge devient inférieur à 80% la batterie commence à accepter de plus en plus le courant issu du freinage (comme le courant correspondant au sous-cycle 21 dans la Fig.5). En conclusion, dans un véhicule alimenté uniquement par le pack batterie, la forme du courant change durant les 8 heures de travail de la BOM.

Grace à la priorité donnée à la recharge des supercondensateurs en phase de freinage, le pack batterie de la BOM alimentée par la source hybride (appelé dans la suite **pack assisté**) n'est quasiment pas sollicité en recharge, quel que soit l'état de charge de la batterie (Fig.5). Dans ce cas, le profil du courant à appliquer lors du cyclage du pack assisté reste inchangé toute la journée.

Du point de vue de la consommation journalière d'énergie, pour cette application, le véhicule alimenté uniquement par une batterie consomme 12% de plus que celui alimenté par une source hybride (Fig.6). Ce pourcentage dépend du courant max acceptable dans la batterie, de l'état de charge initial de la batterie, du profil de mission ... Au niveau de la batterie cela implique des niveaux de décharges différents, des courants instantanés différents, ... Il est donc évident que pour un même état de charge initial, la durée de vie d'un pack non-assisté sera moindre car la batterie sera plus déchargée. Pour cette raison, comparer directement la durée de vie des deux sources (batterie contre source hybride) n'est pas aisé.

2.2. Profils de courant utilisé pour le cyclage – banc de test

Afin de tenir compte de ces remarques importantes, nous avons fait l'hypothèse de comparer deux packs de batteries qui fonctionnent dans la même fenêtre d'état de charge mais soumises à des profils de courant (très) différents. Cette exigence se traduit par la valeur efficace du courant. Il s'agit du cas le plus défavorable du point de vue du stockage hybride.

Pour simplifier la procédure de cyclage du pack non-assisté nous avons défini un profil de courant journalier équivalent. Ce profil est constitué de 12 cycles type « sous-cycle 1 » suivis de 12 cycles type « sous-cycle 21 ». Le profil de courant journalier du pack assisté est inchangé, soit 24 répétitions du « sous-cycle 1 » correspondant au pack assisté.

Tableau 2. Caracteristiques du profil de courant journalier : simulé et implémenté dans le cyclage

	Profil de courant journalier (simulé)		Profil de courant journalier équivalent	
	Pack non-assisté	Pack assisté	Pack non-assisté	Pack assisté
Capacité déchargée	129.5 Ah	110 Ah	50 Ah	48 Ah
Courant efficace batterie	48 A	24 A	15.6 A	9 A
Energie délivrée (MJ/jour)	188	166	21	18
Energie délivrée (MJ/jour/ batterie)	2.7 MJ	2.4 MJ	2.05 MJ	2 MJ
Stockage	2x34 batteries	2x34 batteries	2x10 batteries	2x9 batteries

Par cette modification nous n'avons pas enfreint les deux observations importantes issues de la simulation : la même consommation énergétique (différence d'uniquement 2.5% dans le Tableau 2) et un grand écart entre les valeurs efficaces des courants (ratio de 2 dans la simulation, 1.7 dans la pratique).

Le banc de cyclage (illustré dans la Fig.7) est composé de deux packs batteries et de deux convertisseurs DC/AC comme interface entre le secteur et les packs.

Chaque pack est composé de 10 batteries VRLA (Valve Regulated Lead Acid) connectées en série (120V au total), de type AGM (Absorbed Glass Mat) avec des électrodes de plomb pur, de chez EnerSys. La capacité unitaire des modules est de 81Ah à 25°C pour une décharge à courant constant jusqu'à 1.5V/cellule.

Les convertisseurs AC/DC (0-600V_{DC}, max ±66A_{DC}) sont des alimentations et charges à la fois, car bidirectionnels en courant, de type TopCon GSS de chez Regatron.

Les 20 tensions des batteries, les deux courants et la température ambiante ont été enregistrés sur deux Graphtec à 1Hz. La précision de la mesure de tension est de 0.5% sur l'échelle de 20V et celle du courant de 1% de la pleine échelle 80A. Les profils de courant mémorisés par les convertisseurs (CVS) TopCon GSS ont été reproduits à 1Hz également.



Fig.7 Banc de cyclage

3. PROCEDURE DE CYCLAGE

Avant le début du cyclage les 20 batteries ont été soumises individuellement à plusieurs tests :

- Minimum 3 charges-décharges (selon une procédure décrite ultérieurement),
- Des spectroscopies d'impédance avec un spectromètre Zahner EIS à l'état de charge de 100% (0A_{DC}+0.5A_{AC}, fréquences de 100μHz à 2.5kHz) et température ambiante,
- Mesure de la résistance DC pour un courant en créneau de 80A ; nous avons confirmé la valeur de la résistance série ESR_{DC} de 1.73mΩ à 100%SoC et température ambiante,
- Mesure de la capacité selon le protocole CC-CV : charge à courant constant (10A), suivi d'une charge à tension constante (14.3V) jusqu'à atteindre un courant de charge de 500mA ; nous avons considéré avoir atteint un état de charge de 100%. La capacité est mesurée pendant la décharge CC-CV : décharge à courant constant (10A) suivi d'une décharge à tension constante (10.5V) afin d'atteindre 500mA. Ce protocole a été suivi chaque fois qu'il y a eu besoin de mesurer une capacité. Les capacités initiales ainsi que rendement énergétique sont détaillées dans le Tableau 3.

La procédure de cyclage (Fig.8) comporte une décharge des batteries sous le profil de courant imposé (environ 6.5 heures), la recharge (nocturne) à courant constant en trois paliers, d'environ 13 heures suivie d'une phase de repos de minimum 2 heures. La phase de décharge a été arrêtée à la fin du profil de courant journalier ou chaque fois que la tension d'une des batteries est passée sous 10.5V.

La charge est très importante dans la vie d'une batterie au plomb. Le fabricant (des batteries utilisées dans notre projet) recommande une charge sous une tension constante sans limitation du courant. Néanmoins, nous avons choisi une charge à courant constant, pour des raisons de sécurité principalement, car nos batteries ont été chargées en série et sans aucun circuit d'équilibrage (seule une surveillance de tensions individuelles assurait la sécurité). Le profil du courant de charge est composé de trois paliers de courant : 15A (1 heure) – 5A (4 heures) – 2A (sans limite de durée). La charge a été arrêtée quand une des tensions a atteint 14.3V.

Tableau 3. Capacités initiales des batteries testées

Capacité (Ah)		Energie (MJ)		η énergétique (%)	
Assisté	NAssisté	Assisté	NAssisté	Assisté	NAssisté
111	106	4.77	4.5	90	91
111	115	4.77	5	90	90.5
110	110	4.75	4.75	90	90.5
127	109.5	5.4	4.72	91.4	90
124	116	5.28	4.98	91.4	90
123	106	5.2	4.56	88	90
113	106	4.9	4.57	91	90.5
129	109.5	5.55	4.71	91	90
124	108	5.3	5.64	86	91
131	116	5.64	4.98	90	90.5

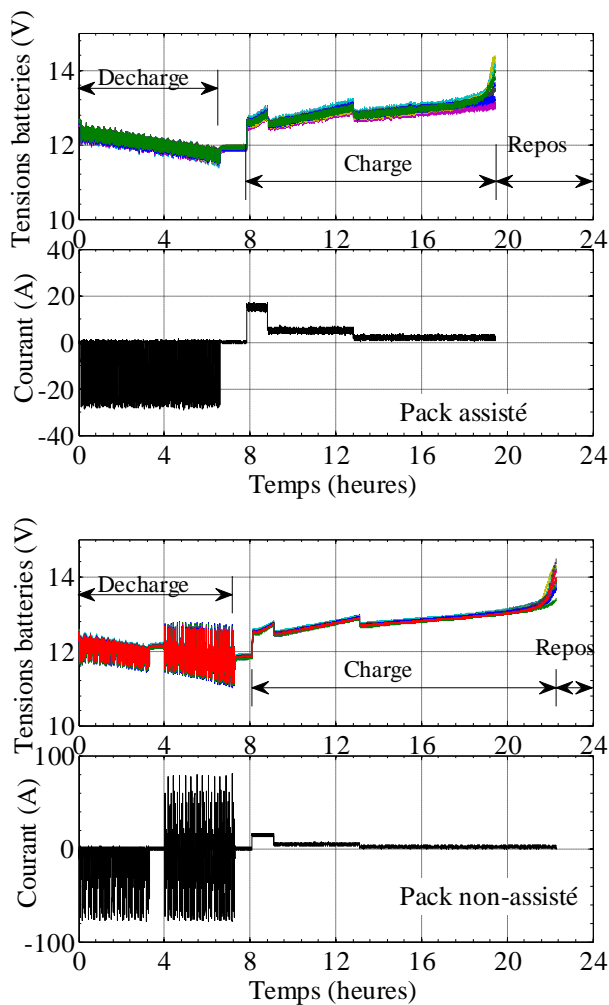


Fig.8 Profil de courant journalier appliqué (mesures)

Un réajustement des phases de décharge journalière et recharge, en fonction de la diminution des capacités des packs, a été effectué régulièrement. Quand la capacité des packs a diminué, la durée de la charge à 5A a été réduite de manière à finir toujours par une charge à 2A.

La durée de l'essai est un facteur important. Réduire cette durée est assez délicat car cette opération peut favoriser d'autres modes de défaillance que celui qui apparaîtra dans un fonctionnement normal. Afin d'accélérer le vieillissement, nous avons eu plusieurs options : cyclage à température plus élevée, modification du profil de courant (impossible en raison de l'importance des auxiliaires dans la consommation) ou une décharge plus profonde. Cette dernière solution nous paraît la plus raisonnable et proche de la réalité.

Le choix de la fenêtre d'état de charge est soumis à plusieurs contraintes. La limite haute est issue d'un compromis entre le surdimensionnement (qui nécessiterait un SoC initial de 100%) et l'acceptabilité en charge (importante pour des SoC inférieures à 80%). Les simulations ont été faites en se basant sur l'hypothèse d'un état de charge initial de 100%. Malheureusement, cet état de charge est difficilement atteignable par une charge à courant constant.

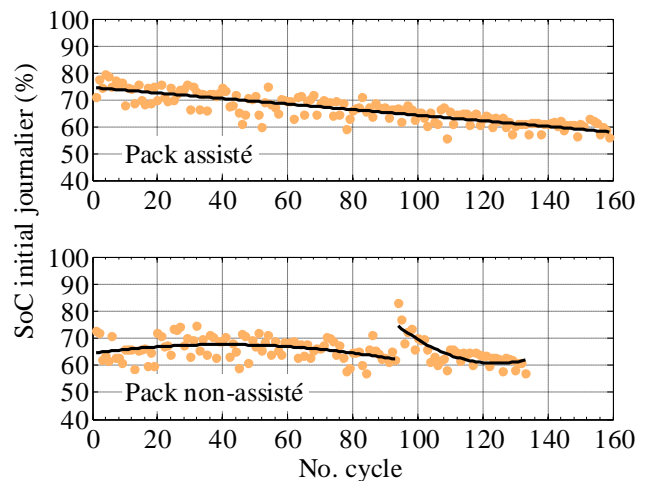


Fig.9 Evolution de l'état de charge avant chaque cycle (estimation)

La limite basse est fixée par un critère de durée de vie : plus on décharge une batterie au plomb, plus on diminue sa durée de vie. D'après le constructeur, notre batterie dure 600cycles charge-décharge à courant constant (20°C) si la batterie est déchargée jusqu'à 20% d'état de charge. En tenant compte de ces contraintes, nous avons choisi de fixer la fenêtre d'état de charge entre 70 et 20%. Dans la Fig.9 nous montrons l'évolution de l'état de charge initiale (en début de journée, avant le début d'un nouveau cycle journalier). Cette estimation est basée sur la capacité initiale des batteries et après un repos de minimum 2 heures.

La recharge correspondante au cycle 93 a été effectuée à tension constante pour tester un possible regain de capacité des batteries du pack non-assisté. Ce regain fut de courte durée, comme le montre la figure 10.

Tout au long de l'essai nous avons interrompu régulièrement le cyclage pour mesurer la capacité d'une (seule) batterie de chaque pack (toujours la même) ; le résultat est présenté dans la Fig.11.

Le cyclage a été arrêté quand les packs n'ont pas été capables de délivrer plus de la moitié de l'énergie initiale.

Pendant le cyclage, deux batteries du pack assisté ont perdu environ 50% de leur capacité initiale et ont été enlevées après les cycles 76 et 106. Le pack non-assisté n'a perdu aucune batterie.

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'objectif du cyclage est de vérifier l'effet bénéfique de l'association des supercondensateurs aux batteries sur la durée de vie des batteries au plomb. Quantifier ce gain n'est pas facile car les conditions de cyclage, propres à chaque application, influencent de manière décisive la durée de vie.

Si nous considérons comme critère de fin de vie la réduction de la capacité initiale des batteries de 20%, le pack assisté a un net avantage, car il a une durée de vie presque 2 fois plus grande que celle du pack non-assisté : 90 cycles contre 50 cycles (Fig.11).

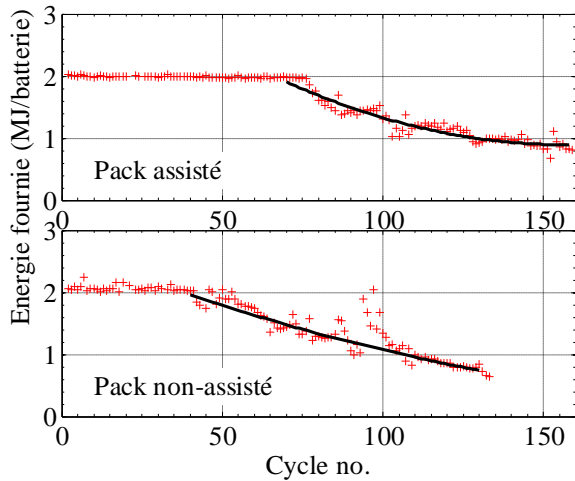


Fig.10 Energie fournie par chaque batterie

Mais si le critère fin de vie est lié à l'énergie fournie, l'assistance des supercondensateurs augmente la durée de vie des batteries d'environ 40% soit 73 cycles contre 52 cycles (Fig.10).

Si l'hybridation est bénéfique pour la consommation énergétique et pour la durée de vie des batteries, l'état de santé des batteries est également important pour la maintenance. Comme les conditions du cyclage sont quasiment les mêmes (en termes de température et procédure de décharge, la charge étant très légèrement différente) nous avons fait l'hypothèse d'avoir excité les mêmes processus de vieillissement. Les spectroscopies d'impédance présentées Fig.12 renforcent cette hypothèse, car les impédances des batteries de deux packs se sont modifiées dans le même sens : forte augmentation de la double couche et réduction de la diffusion. Cette modification de l'impédance interne a moins d'influence sur le pack assisté car l'énergie et la puissance sont dissociées dans la source hybride.

La résistance interne DC des 20 batteries est restée inchangée ce qui montre que l'électrolyte et les connexions sont en bon état.

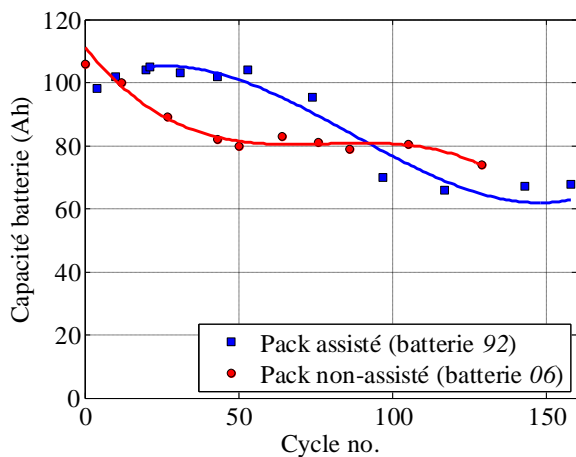


Fig.11 Evolution de la capacité des batteries témoins

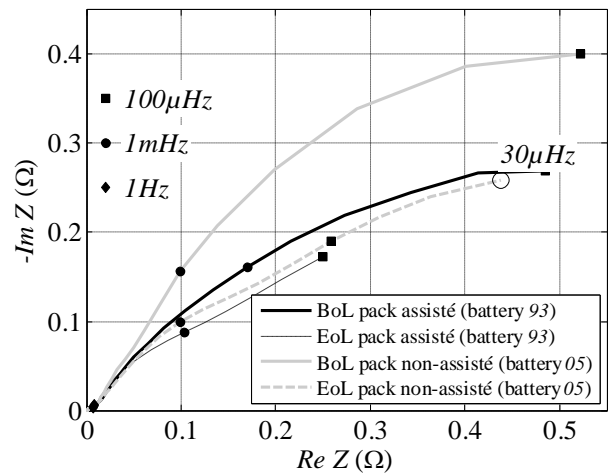


Fig.12 Spectroscopies d'impédance typiques à 100% SoC (EoL – fin de vie, BoL – début de vie)

La réduction de la capacité est due probablement à la sulfatation, mais uniquement une analyse post-mortem peut la confirmer. La sulfatation est accélérée par une recharge à faible courant (qui ne chauffe pas la batterie pour dissoudre les cristaux de sulfate de plomb). Un facteur supplémentaire pourrait s'ajouter dans le cas du pack assisté, le choix de ne pas charger la batterie pendant la décharge avec les quelques pointes de courant issus du freinage. Cette hypothèse pourrait trouver une confirmation dans l'homogénéité des courbes correspondantes au pack non-assisté contre pack assisté dans le test d'acceptabilité en charge – Fig.13. Dans ce test une batterie vide est chargée à tension constante (14.3V dans notre cas) sans limitation de courant. Le courant de charge représente le courant maximal que la batterie accepte en fonction de son état de charge.

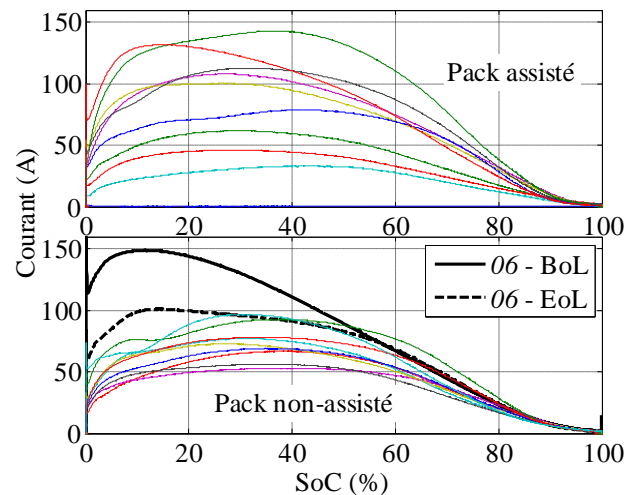


Fig.13 Acceptabilité en charge – toutes les batteries vieilles

5. CONCLUSIONS

L'association des supercondensateurs et batteries au plomb est bénéfique aux batteries du point de vue de la durée de vie de ces derniers. Des économies d'énergie peuvent être réalisées si le pack de supercondensateurs est choisi de manière appropriée. Le management de l'énergie à bord peut conduire à la diminution des pertes dans les batteries, à moins d'échauffement et à l'augmentation de leur durée de vie – jusqu'à 40% de plus dans l'application étudiée. Néanmoins il faut améliorer la gestion d'énergie afin d'éviter un vieillissement prématuré des batteries.

6. REFERENCES

- [1] N.S. Pearre, W. Kempton, R.L. Guensler, V.V. Elango, « Electric vehicles: How much range is required for a day's driving? », *Transportation Research Part C* 19 (2011) 1171–1184.
- [2] S.J. Gerssen-Gondelach, A.P.C. Faaij, « Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term », *Journal of Power Sources* 212 (2012) 111-129.
- [3] G. Papazov, D. Pavlov, « Influence of cycling current and power profiles on the cycle life of lead/acid batteries », *Journal of Power Sources* 62 (1996) 193-199.
- [4] A.J. Ruddell, A.G. Dutton, H. Wenzl, C. Ropeter, D.U. Sauer, J. Merten, C. Orfanogiannis, J.W. Twidell, P. Vezin, « Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems », *Journal of Power Sources* 112 (2002) 531–546.
- [5] S. Butterbach, B. Vulturescu, Ch. Forgez, G. Friedrich, G. Coquery, « Design of a Supercapacitor-Battery Storage System for a Waste Collection Vehicle », *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010, Lille (France).
- [6] C.R. Akli, X. Roboam, B. Sareni, A. Jeunesse, « Energy management and sizing of a hybrid locomotive », *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007, Aalborg (Denemark).
- [7] M. Ortúzar, J. Moreno, J. Dixon, « Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation », *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 54 (4) (2007) 2147-2156.
- [8] R. Carter, A. Cruden, P.J. Hall, « Optimizing for Efficiency or Battery Life in a Battery/Supercapacitor Electric Vehicle », *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61 (4) (2012) 1526-1533.
- [9] H.A. Catherino, J.F. Burgel, P.L. Shi, A. Rusek, X. Zou, « Hybrid power supplies: A capacitor-assisted battery », *Journal of Power Sources* 162 (2006) 965–970.
- [10] N. Shidore, T. Bohn, « Evaluation of cold temperature performance of the JCS-VL41M PHEV battery using Battery HIL », *SAE 2008-01-1333*, SAE World Congress 2009, Detroit (EUA).
- [11] P. Angers, « Supercapacitors – do they improve the battery life? », *21th Electric Vehicle Symposium*, 2005, Monaco.
- [12] N. Omar, J. Van Mierlo, B. Verbrugge, P. Van den Bossche, « Power and life enhancement of battery-electrical double layer capacitor for hybrid electric and charge-depleting plug-in vehicle applications », *Electrochimica Acta* 55 (2010) 7524–7531.
- [13] R. Trigui, B. Jeanneret, F. Badin, « Systemic modelling of hybrid vehicles in order to predict dynamic performance and energy consumption. Building the VEHLIB library of models », *Recherche Transports Sécurité* 83 (2004) 129-150.
- [14] S. Butterbach, B. Vulturescu, Ch. Forgez, G. Coquery, G. Friedrich, « Lead-acid battery model for hybrid energy storage » *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, Chicago (USA).