

# MODÉLISATION D'UN SYSTÈME DE STOCKAGE HYBRIDE BATTERIE ET SUPERCONDENSATEUR

Pierre DIENOT, Hugo WOUTERS, Xiaoshuang WU

**Abstract**— Nous allons étudier dans ce projet la réponse d'un système stockage hybride à un profil de charge donné. Les avantages et inconvénients des différentes technologies abordées justifiera l'utilisation d'un système hybride composé d'un supercondensateur et d'un stockage électrochimique Acide-Plomb.

## I. INTRODUCTION

Les préoccupations environnementales actuelles amènent à repenser la façon de produire et d'utiliser l'énergie électrique. L'épuisement des ressources et la pollution générée par les modes de production traditionnels remettent en cause leur utilisation. Les énergies renouvelables en pleine expansion depuis la fin du 20ème siècle constituent actuellement une alternative. Néanmoins, les modes de production sont plus complexes et requièrent des dispositifs supplémentaires, notamment pour gérer l'intermittence du gisement. Il est ainsi nécessaire d'avoir recours à des systèmes de stockage conçus pour fonctionner de manière efficace.

## II. DEFINITION DU PROJET

Pour justifier le recours à un système de stockage hybride batterie - supercondensateur, les caractéristiques de ces deux types de stockages sont tout d'abord étudiées séparément puis sous la forme d'un système hybride. Plusieurs configurations simples ou hybrides sont ensuite modélisées sur le logiciel MATLAB pour comparer les différentes solutions de stockages selon des critères de performance (technique, coût, mise en oeuvre).

## III. STOCKAGE ELECTROCHIMIQUE

### A. Principe de fonctionnement

La totalité des stockages électrochimiques fonctionnent sur le principe de réactions d'oxydoréductions et requièrent trois éléments essentiels : la cathode, l'anode et l'électrolyte.

Les deux électrodes métalliques (cathode et anode) sont d'une part séparées par une solution conductrice (électrolyte) et d'autre part reliées par un fil traversé par un courant électrique ce qui forme une sorte de circuit électrique fermé.

Une batterie ne stocke pas d'électricité à proprement parler, elle convertit l'énergie électrique en énergie potentielle chimique. Le déplacement d'électrons nécessaire à la production d'électricité est rendu possible grâce aux réactions d'oxydations de l'anode et de réduction de la cathode.

Dans le cas de la décharge les électrons vont donc de l'anode vers la cathode et la batterie sera considérée

comme vide lorsque la totalité de l'anode sera oxydée. On parle de SOC (State Of Charge) à 0% dans ce cas. En mode recharge, la batterie sera considérée comme pleine (SOC=100%) lorsque la totalité de l'anode aura été réduite.

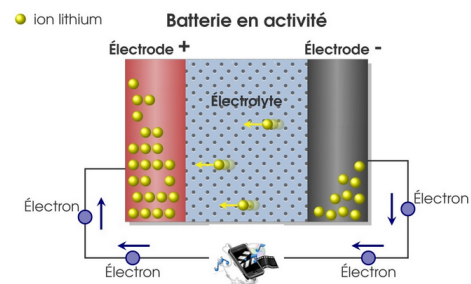


Fig. 1. Fonctionnement simplifié d'une batterie

### B. Caractéristiques techniques

Les trois paramètres les plus importants pour un stockage sont la puissance, la capacité et les limites de fonctionnement.

1) *Puissance*: Une cellule d'accumulateur (couple cathode/anode/électrolyte) délivre seulement entre 2 et 4 Volts de tension, les batteries sont donc constituées d'assemblages de cellules, appelés accumulateurs.

Ces assemblages sont réalisés en série fig. 2 pour permettre d'avoir un voltage global plus élevé que le voltage unitaire (addition des tensions de chaque cellule). Cette configuration permet ainsi d'obtenir une puissance plus importante.

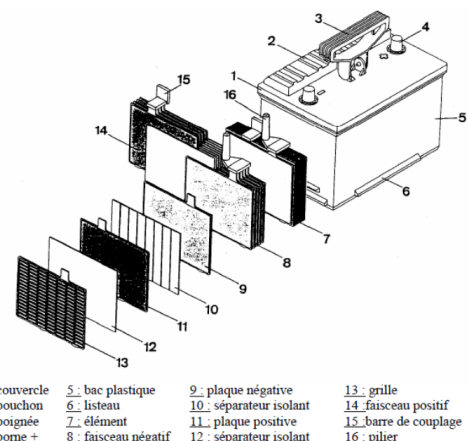


Fig. 2. Composition d'une batterie comme étant une série d'accumulateurs

La génération d'électricité n'a pas recours à des électro-

aimants ni à l'utilisation d'un champ magnétique, les stockages électrochimiques fonctionnent donc en courant continu.

2) *capacité énergétique*: Les stockages électrochimiques ont une énergie massique (Wh/kg) considérable. Le stockage d'énergie sous forme chimique requiert beaucoup de place pour que les réactions s'effectuent. De nombreuses technologies ont été développées pour optimiser l'espace comme des structures d'électrodes en spirales ou des empilements. Les caractéristiques des batteries dépendent aussi des matériaux utilisés pour les électrodes et de la solution choisie pour l'électrolyte. Les associations les plus utilisées à l'heure actuelle sont :

- Nickel - Cadmium (NiCd)
- Hydrures métalliques de nickel (NiMH)
- Aux ions de lithium (Li-ion)
- Plomb - Acide

3) *Limites de fonctionnement*: Chaque batterie a des limites de fonctionnement qui permettent de l'utiliser dans des conditions optimales. La limite de charge/décharge est indiquée sous la forme  $C_{xx}$  par le constructeur. Par exemple, une batterie "50Ah C0.2" à un courant nominal de  $50 \times 0.2 = 10A$ .

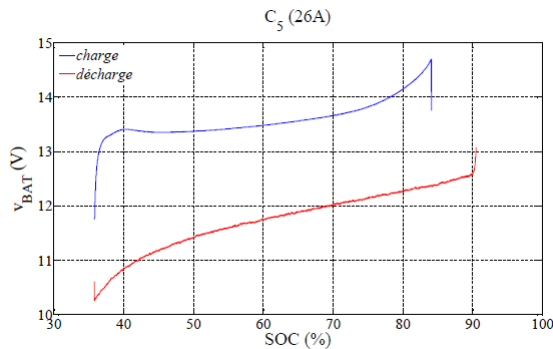


Fig. 3. Cycle de charge-décharge d'une batterie plomb-acide Solar Sonnenschein 12V/130Ah

Des limites sont aussi fixées au SOC, pour garantir le bon fonctionnement de la batterie (en maintenant des valeurs de tensions adéquates). Le SOC doit ainsi rester dans une plage de valeurs comprise entre environ 35% et 85%. La fixation de cette limite permet d'éviter un effondrement de tension (et donc de puissance, fig. 3).

Ces encadrements de puissance et de SOC ont un impact direct sur la durée de vie/nombre de cycles (détérioration accélérée des électrodes et de l'électrolyte). La durée de vie est aussi dépendante de la source de courant connectée lors de la charge. En raison d'un courant nominal relativement faible, la durée de charge est actuellement un inconvénient majeur du stockage électrochimique et se compte le plus souvent en plusieurs heures (plus de 10h pour une batterie 12V de véhicule thermique). Toutes ces limites sont à prendre en compte dans le modèle afin d'évaluer la pertinence d'un système de stockage face à une charge.

4) *Comparatif Lithium-Ion et Acide-Plomb*:

		Plomb acide	Lithium ion
Energie stockée	Décharge lente en 20 heures (Wh/kg)	40	200
	Décharge rapide en 30 minutes (Wh/kg)	20	190
Prix (€/Wh)		0,2	0,65

### C. Hypothèses de modélisation

Dans notre modélisation, une batterie sera utilisée pour garantir un stockage/déstockage important d'énergie dans le temps. Les batteries Lithium-Ion (très efficaces) et Acide-Plomb (plus économiques) seront abordés.

La batterie a été modélisée grâce à un module Battery de Simulink ce qui est équivalent à un assemblage de plusieurs batteries élémentaires en série. Les caractéristiques de la batterie en fonction de la technologie choisie sont les suivantes:

- Tension Nominale = 200 V
- Capacité = 54 Ah
- SOC initial = 50%
- Courant Nominal (Acide-Plomb) = 10,8 A
- Courant Nominal (Lithium-Ion) = 23,4 A

### D. Etat de l'art

Les stockages électrochimiques sont très utilisés pour des appareils ne nécessitant pas de grandes puissances (smartphones, ordinateurs portables, voiture thermique, affichage public). En revanche, leur utilisation est contraignante pour des demandes de puissance plus élevées comme les véhicules électriques.

## IV. STOCKAGE ELECTROSTATIQUE

### A. Principe de fonctionnement

Un supercondensateur fonctionne sur le même principe qu'un condensateur (effet capacitif) dont la particularité est de permettre le stockage d'énergie sous forme statique. Lorsqu'une capacité est mise sous tension, des charges s'accumulent sur ses deux pôles.

Plus précisément, cela peut être assimilé à une capacité constituée de 2 électrodes séparées par un isolant. Malgré la présence de l'isolant, l'influence électrostatique exercée par l'accumulation entraîne un courant électrique aux bornes du générateur. L'accumulation progressive fait ainsi croître la tension aux bornes de la capacité qui joue le rôle de stockage comme l'identifie la relation :

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

Avec C la capacité en Farad et U la tension aux bornes du supercondensateur en Volts.

### B. Caractéristiques techniques

En suivant la même démarche que pour la batterie :

1) *Puissance*: Etant donné que la capacité est liée au déplacement d'électrons dans un conducteur, la vitesse à laquelle les charges sont accumulées est très élevée. Cela induit ainsi une tension qui devient rapidement élevée et donc la même évolution pour la puissance. La décharge et la charge se font donc habituellement pour de grandes puissances massiques (entre 1 000 et 5 000 W/kg).

Pour les mêmes raisons que le stockage électrochimique, un supercondensateur fonctionne en courant continu.

2) *capacité énergétique*: La capacité de stockage est le principal point faible d'un supercondensateur car celle-ci est relativement faible (entre 4 et 6 Wh/kg).

A l'heure actuelle, la technologie la plus utilisée est le supercondensateur à double couche électronique (ajout d'un électrolyte entre les 2 électrodes, *fig. 4* car elle permet d'avoir des valeurs de capacités élevées (entre 0,1 et 0,3 F.m).

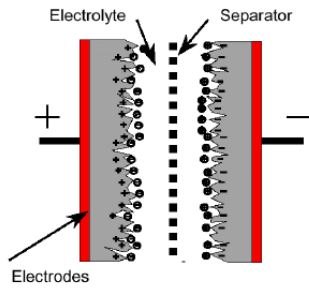


Fig. 4. Fonctionnement d'un supercondensateur à double couche électronique (sur l'interface électrolyte-electrode)

La mise en parallèle des supercondensateurs présente l'avantage de permettre l'addition des capacités dans cette configuration ci :

$$C_{sys} = \sum_{i=0}^n C_i \quad (\text{Parallèle})$$

$$C_{sys} = \sum_{i=0}^n \frac{1}{C_i} \quad (\text{Série})$$

Il est aussi possible de jouer sur la tension (en série) ou sur la capacité de stockage (parallèle) d'après l'équation (1) pour augmenter le stockage. Il peut être utile de les monter à la fois en parallèle et en série pour combler la faiblesse de cette technologie qui reste la capacité. Il faut également prendre en compte les limites du système en terme de tension finale voulue.

La capacité d'échange des électrodes joue aussi un rôle dans la capacité à stocker des électrons comme le montre la formule suivante :

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{e}$$

Avec  $\epsilon$  la permittivité de l'isolant,  $S$  la surface d'une électrode en  $m^2$  et  $e$  l'épaisseur du diélectrique en m. Une surface plus grande permettra ainsi de maximiser la capacité du supercondensateur.

3) *Limites de fonctionnement*: Le supercondensateur possède ainsi une capacité propre exprimée en Farad, la charge complète va être atteinte pour une tension précise aux bornes de la capacité. Contrairement à l'électrochimique il n'y a

pas de modification de structure des électrodes, les matériaux sont donc moins sollicités. Cela permet d'allonger la durée de vie de la batterie à quelques centaines de milliers de cycles. La tension est un des premiers paramètres à surveiller lorsqu'un supercondensateur est en cycle de charge. La limite haute de tension est habituellement de 2,7 V pour une cellule. En effet, une tension trop élevée risque de diminuer la durée de vie du système de stockage. La résistance interne très faible des supercondensateurs oblige aussi à réguler le courant délivré à ses bornes pour éviter les dommages liés à un court-circuit (étincelles, échauffement).

### C. Hypothèses de modélisation

Dans la simulation, une capacité simple sera utilisée pour modéliser le supercondensateur puisque c'est le phénomène capacitif qui est en jeu dans les supercondensateurs. Les caractéristiques de la capacité utilisée sont :

- Tension initiale = 200 V
- SOC initial = 80%
- Capacité = 5 F

### D. Applications

Les supercondensateurs se situent dans un domaine intermédiaire entre les stockages électrochimiques (faible puissance massique, grande énergie massique) et les condensateurs conventionnels (grande puissance massique, faible énergie massique). Ils sont donc utilisés dans les voitures électriques, et dans les transports en commun pour la recharge des bus ultra rapide en milieu urbain ou la récupération de l'énergie de freinage des métros.

## V. STOCKAGE HYBRIDE

Les systèmes hybrides sont constitués de stockages électrochimiques couplés à des supercondensateurs. La charge et la décharge peut se faire de façon couplée ou découplée. La tension délivrée par ces deux systèmes doit être régulée pour permettre de fournir ou prélever une puissance à une tension de charge constante.

## VI. MODÉLISATION ET SIMULATION

### A. Hypothèses

Pour exploiter au mieux de leurs capacités les deux types de stockages, il est nécessaire d'avoir des tensions nominales de départ du même ordre de grandeur, c'est pour cela qu'il a été choisi de modéliser une batterie et un supercondensateur de 200 V.

Une source de courant impose le profil de charge. Cette source peut représenter la demande en puissance d'un petit véhicule électrique. Pour simplifier le fonctionnement du véhicule, nous considérons que l'accélération mène à une augmentation du courant. Quand le véhicule roule à vitesse constante, le courant sera aussi constant. Le freinage qui n'utilise pas d'énergie du système de stockage peut être considéré comme une période de rechargement dû à un courant négatif. Un profil de charge en intensité peut donc représenter un profil de vitesse d'un véhicule.

Le dispositif à alimenter est modélisé de manière simple par une capacité appelée « bus » et une source de courant qui font office de charge à une tension fixée.

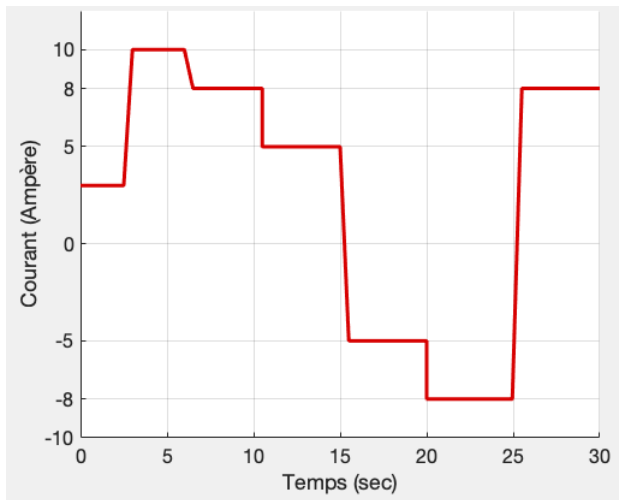


Fig. 5. Profil de charge utilisé

Le profil de charge *fig. 5* du dispositif à alimenter varie entre 10 A et -8 A. Il permet de mettre en jeu plusieurs cas de figure de couplage batterie - supercondensateur en charge et décharge.

### B. Fonctionnement

Le stockage modélisé est soumis à un profil de charge en intensité et la tension de sortie est fixée à 400 V . Des convertisseurs DC-DC (hacheurs) sont alors couplés à une régulation (Proportionnelle Intégrale) de la tension et à un algorithme de répartition du courant afin de fixer la tension de sortie du dispositif tout en optimisant l'utilisation des stockages d'énergie.

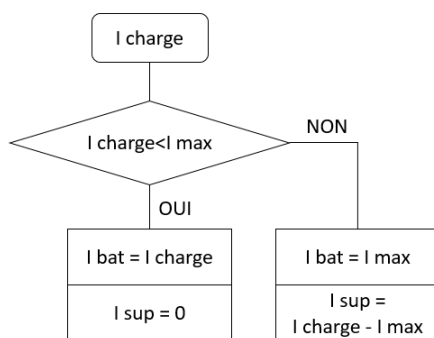


Fig. 6. Schéma de fonctionnement batterie

La *fig. 6* explique schématiquement l'algorithme de répartition du courant entre les deux stockages. Selon l'intensité donnée par le profil de charge, le système détermine si le besoin dépasse le courant nominal de la batterie. Si c'est le cas, le supercondensateur fournit la courant qu'il faut pour compenser et la batterie travaille à courant nominal. Si le courant à fournir est inférieur au nominal de la batterie, elle fournit l'énergie toute seule.

### C. Simulation avec la batterie Lithium

Dans un premier temps, une batterie en Lithium est utilisée comme seule source d'énergie (pas de supercondensateur).

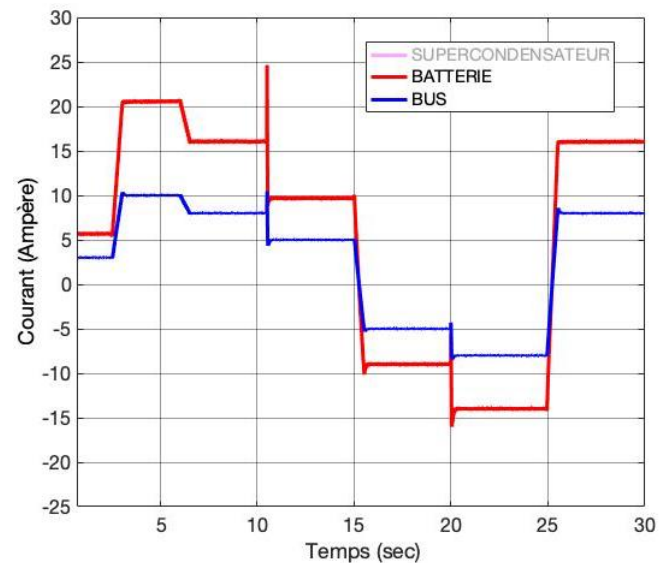


Fig. 7. Courants de la batterie Lithium-ion et la charge

La *fig. 7* montre le courant pour la batterie et dans la charge. Le courant fourni par la batterie est inférieur au nominal (23 A) ce qui rend viable l'utilisation d'une telle technologie. Le courant dans la batterie est deux fois plus grand que celui dans le bus car la tension dans le bus est deux fois plus grande (400 V contre 200 V).

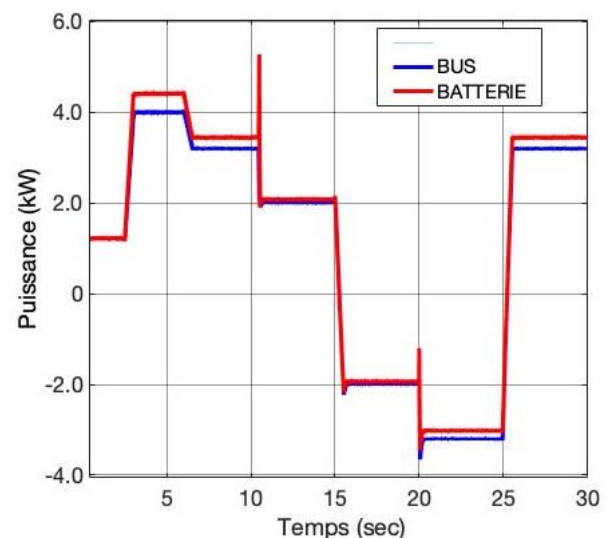


Fig. 8. Puissance fournie par la batterie Lithium-ion

La puissance de la charge *fig. 8* est sensiblement égale à la puissance de la batterie, car l'énergie est fournie entièrement par la batterie Lithium-ion.

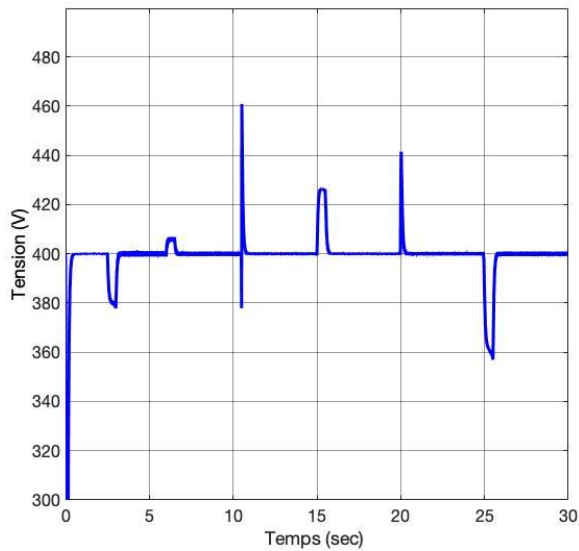


Fig. 9. Tension de la charge

La régulation PI de la tension permet de garder la consigne de 400 V aux bornes de la charge malgré un courant qui varie et qui s'inverse. Les pics correspondent aux changement de valeur de courant pour la charge qui demandent un réajustement du système.

La batterie Lithium-Ion est capable de répondre au profil de charge en restant dans ses valeurs nominales. Cependant cela a un prix, cette technologie étant quatre fois plus chère au kWh que l'Acide-Plomb.

#### D. Simulation avec la batterie Plomb

Dans un deuxième temps, une batterie Acide-Plomb est utilisée comme seule source d'énergie.

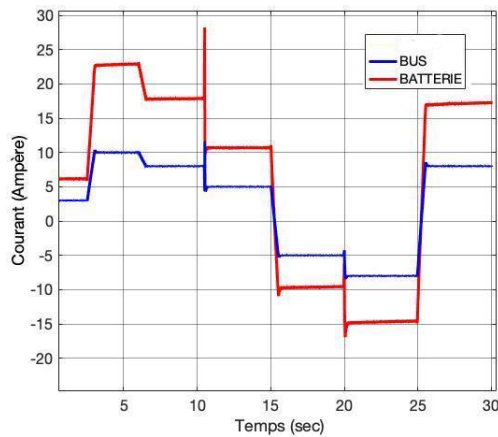


Fig. 10. Courants de la batterie Acide-Plomb et la charge

La fig. 10 est identique que dans le cas précédent. La puissance fournie et la tension de la charge sont aussi les mêmes (non représentés ici). Cependant, le courant nominal de cette batterie est de 10,8 A soit seulement la moitié

du maximum atteint ici. Utilisé au delà de ses valeurs nominales, cette batterie verra ses performances décroître. Il y aura un vieillissement prématuré du à un manque de cyclabilité dans ces conditions.

Pour palier à cette détérioration certaine et profiter de cette technologie à bas coût, un supercondensateur peut être utilisé afin de veiller à ce que la batterie reste dans ces conditions nominales de courant (10,8 A) et de puissance ( $10,8 \text{ A} * 200 \text{ V} = 2,16 \text{ kW}$ ) tout en répondant au profil de charge voulu.

#### E. Simulation avec le système hybride

Enfin, la batterie Acide-Plomb précédemment utilisée est couplée à un supercondensateur pour répondre au profil de charge.

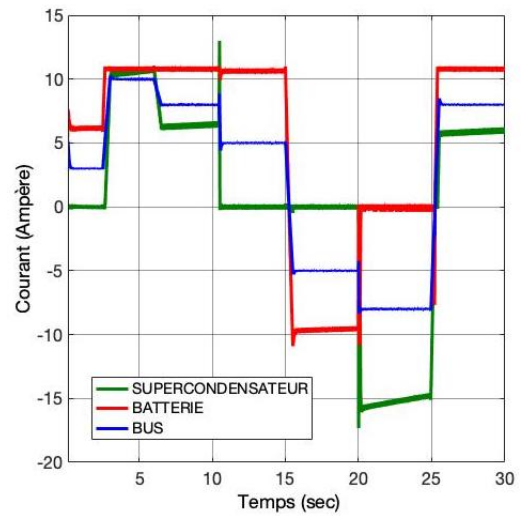


Fig. 11. Courants de la batterie, supercondensateur et la charge

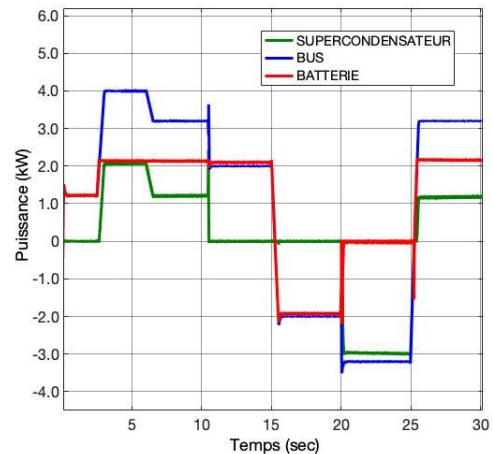


Fig. 12. Puissance du système hybride et la charge

Les fig. 11 et fig. 12 représentent la répartition de l'intensité et puissance fournie ou prélevée au bus par la batterie et/ou le supercondensateur. A noter que contrairement aux intensités, les puissances s'additionnent dans ce cas



ou les tensions différent. Une puissance négative représente un recharge du stockage. Ces simulations permettent de distinguer tous les couplages possibles en charge et décharge du système hybride:

- 0-3 sec. La puissance demandée par la charge est inférieure au maximum admissible par la batterie (2,16 kW). Le supercondensateur est alors à l'arrêt et la batterie fournit la puissance.
- 3-15 sec. La puissance demandée dépasse celle que peut fournir la batterie en toute sécurité, le supercondensateur débite alors du courant jusqu'à ce que la puissance demandée ne baisse à nouveau.
- 15-20 sec. Une puissance négative indique une recharge qui est ici destinée à la batterie.
- 20-25 sec. La puissance fournie par la charge devient trop importante et est rédigée au supercondensateur.
- 25-30 sec. La charge demande à nouveau une puissance qui est répartie entre la batterie aux conditions nominales et le supercondensateur qui complète la demande.

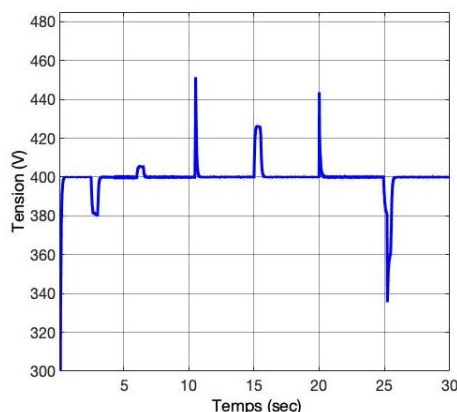


Fig. 13. Tension de la charge

Malgré un courant fortement variable dans les éléments du système hybride et deux stockages qui se chargent/déchargent la régulation de la tension *fig. 13* maintient le bus à 400 V.

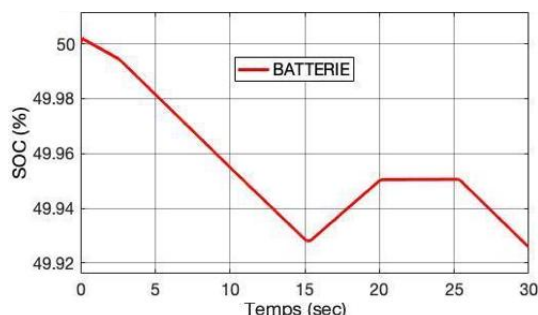


Fig. 14. SOC de la batterie

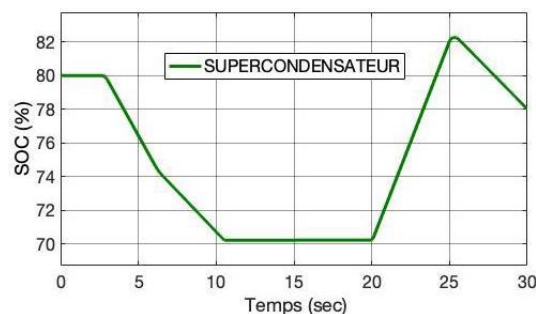


Fig. 15. SOC du supercondensateur

Dans notre cas, le profil de charge inclus une récupération d'énergie qui recharge partiellement la batterie et le supercondensateur *fig. 14 et 15*. La batterie seule n'aurait pas pu assumer seule cette récupération, le supercondensateur sert alors de tampon pour stocker et restituer l'excès entre l'offre et la demande en puissance.

## VII. CONCLUSIONS

Pour des profils de charge qui varient beaucoup et demandent une grande puissance, l'utilisation de batteries Lithium Ion surdimensionnées est efficace mais onéreux (par exemple dans les voitures électriques). Près de quatre fois moins chères, les batteries Acide - Plomb peuvent être avantageusement utilisées à condition de s'assurer qu'elles fonctionnent dans des conditions nominales. Pour cela, un supercondensateur de faible capacité présente deux avantages: il permet à la fois de compléter ponctuellement la demande en puissance du système et de limiter le courant de la batterie. Nous avons montré qu'un système de stockage hybride supercondensateur et batterie Acide-Plomb est capable de répondre au profil de charge imposé dans les meilleures conditions pour la durée de vie de la batterie. Le système hybride peut être plus économique qu'une batterie Lithium-ion seule et permettra de réutiliser de vieilles batteries. Cependant, cette solution reste plus compliquée à mettre en oeuvre.

## REFERENCES

- [1] Marine COGNET, Michaël CARBONI, Stockage de l'énergie: évolution des batteries, 2017
- [2] Guven ALCICEK, Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des applications véhicule électrique, UTBM, 2014
- [3] Issam HOUSAMO, Contribution à l'étude théorique, à la modélisation et à la mise en oeuvre d'un système multisource appartenant à un micro-réseau électrique. Considération sur la qualité de l'énergie, 2012
- [4] SOLISE, Comparaison des différentes technologies de batterie lithium, plomb (<https://www.masolise.com/comparatif-technologie-batterie>)
- [5] DOSSIER BATTERIES A BORD (<https://www.yachter.fr/pdf/batteries.pdf>)
- [6] Supercondensateur (<http://www.supercondensateur.com/faq>)