

# Comparaison entre quatre solutions pour échanger de l'énergie entre systèmes de forte capacité de stockage

Laurent GARNIER ; Daniel CHATROUX ; Sébastien CARCOUET ; Julien DAUCHY

Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France

CEA, LITEN, DEHT, SIGE, LAE F-38054 Grenoble, France

L'électrification de systèmes toujours plus puissants est habituellement corrélée à de plus grands besoins de fiabilité, continuité de service et échanges d'énergie entre sources. Dans le domaine des systèmes de stockage électrochimique d'énergie, ces besoins sont souvent satisfaits en parallélisant des batteries. La déconnexion de deux batteries en parallèle est un processus simple et bien maîtrisé. En revanche, la connexion est un processus bien plus long et compliqué qui requière de l'électronique de puissance adaptée car cela revient à connecter en parallèle deux sources de tension. Basé sur un cas concret d'application et grâce à des simulations, cet article propose une comparaison entre quatre solutions pour échanger de l'énergie entre systèmes batterie lithium-ion et maîtriser la connexion en parallèle de ceux-ci.

*Mots-clés : accumulateur ; batterie ; convertisseur ; échange d'énergie*

## 1. INTRODUCTION – PRESENTATION DU CAS CONCRET D'APPLICATION

Le projet « Easily diStributed Personal RapId Transit » (ESPRIT) H2020 a pour but de développer un véhicule spécifique de type quadricycle lourd (catégorie L) destiné principalement aux systèmes d'auto-partage urbain. Ces véhicules légers ont la particularité de pouvoir s'accoupler les uns aux autres de manière à former un train routier allant jusqu'à huit voitures. Un système pilotable de pivot central sur le châssis du véhicule permet d'obtenir un train routier monotraxe manœuvrable en ville.

La fiabilité d'un système d'auto partage réside dans le fait d'avoir des voitures toujours disponibles dans toutes les stations de retrait sans avoir de risque pour l'utilisateur de se retrouver devant une station vide ou au contraire de ne pas pouvoir rendre son véhicule à la station désirée car elle est saturée. Cette configuration « train » permet une redistribution des véhicules bien plus efficace que les systèmes existants car un seul opérateur est nécessaire pour redistribuer huit voitures en un seul trajet. De plus les voitures pourraient être redistribuées par l'utilisateur lui-même dans une limite d'un train de deux véhicules (de manière à garder un système de proportion équivalente à une berline classique).

Cette configuration permet également un gain de place en stockage ainsi qu'en station de recharge du fait de l'accouplement des véhicules.

Enfin une connexion de puissance est présente sur le système d'accouplement des voitures permettant une transition de l'énergie de véhicule à véhicule. Ainsi un seul chargeur est nécessaire pour recharger l'ensemble des véhicules, ce qui allège considérablement le coût d'infrastructure.

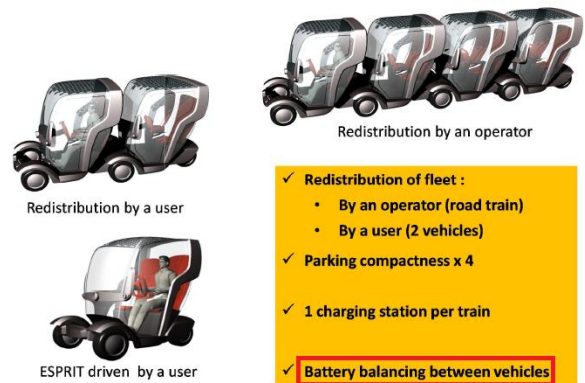


Fig. 1 Illustration des configurations véhicule du projet ESPRIT

Ce système de type « First In First Out » doit être accompagné d'une gestion stratégique de l'énergie entre véhicule. Lors d'une redistribution ou lorsque les véhicules sont stationnés en « train » sans chargeur, il est utile de manager l'énergie entre les véhicules pour que le premier soit toujours dans un état de charge favorable pour une utilisation futur.

## 2. DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

Chaque véhicule embarque une batterie de stockage ainsi qu'une solution de transfert qui permet d'échanger de l'énergie d'une voiture à une autre. L'objectif est de sécuriser autant que possible l'état de charge du premier véhicule du train car il sera le premier à être utilisé. La fréquence des départs des véhicules des stations peut être très variable en fonction du moment de la journée et de la situation géographique de la station. Une stratégie de gestion de charge des véhicules optimisée intégrant des variables liées à l'utilisation des véhicules nécessite une gestion globale de la flotte de véhicule. Dans le cadre du projet, une stratégie simple d'équilibrage des états de charge des véhicules sera mise en œuvre.

L'architecture haut niveau des véhicules est la suivante :

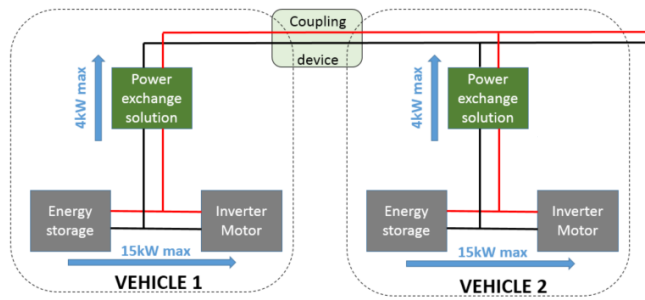


Fig. 2 Architecture électrique haut niveau de deux véhicules accouplés

Les principales caractéristiques des systèmes de stockage d'énergie du projet ESPRIT sont :

- Chimie : LiFePO4
- Format de cellule : 2.3 Ah 26650 typée puissance
- Batterie de 320 V nominale et 3.5 kWh
- Courant maximal échangé entre batterie : 11.5 A, soit un régime de décharge de 1C.

La question à laquelle l'article réponds est la suivante : à partir de critères tels que le rendement, le volume, le coût, la masse, la complexité et la sécurité, le temps d'équilibrage, quelle est la meilleure solution de puissance pour échanger de l'énergie entre batteries en parallèle ?

### 3. MODELE BATTERIE

Pour étayer la comparaison entre les solutions, un modèle simple de batterie a été conçu en se basant sur les paramètres suivants :

- Capacité
- Résistance interne
- Courbe de tension en fonction de l'état de charge
- Propriétés spécifiques sous impulsions de courant

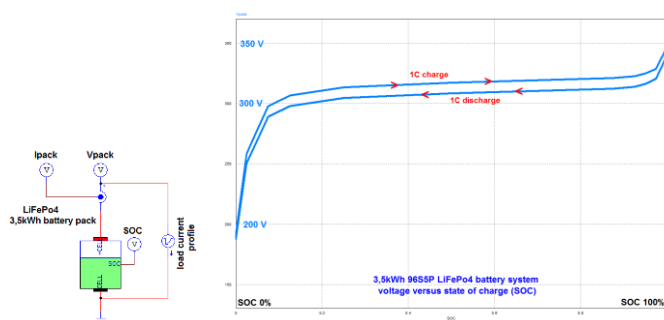


Fig. 3 Symbole et courbe de tension modélisant une batterie

On notera la forme de la courbe de tension en fonction de l'état de charge qui est très « plate ». Cela est dû à la technologie de l'accumulateur choisi LiFePO4 et du fait que l'accumulateur est plutôt typé puissance, c'est à dire avec une faible résistance interne.

### 4. COMPARAISON DE QUATRE SOLUTIONS DE CONVERSION DE PUISSANCE ET D'ÉCHANGE D'ÉNERGIE

Dans cette partie, après avoir détaillé les phénomènes posant problèmes en cas de connexion de deux batteries en parallèles, nous comparons quatre solutions. Le principal objectif de ces solutions consiste à compenser la différence de tension entre les batteries à connecter tout en contrôlant le courant qui va transiter entre elles. Pour effectuer ces comparaisons nous utilisons les hypothèses suivantes :

- Batterie 1 avec un état de charge (SOC : state of charge) initial de 95 %
- Batterie 2 avec un SOC initial à 5 %
- La séquence d'équilibrage est considérée comme terminée lorsque la différence de SOC atteint 10 %.

#### 4.1. Comportement du système sans aucun contrôle de la puissance

Chaque batterie est protégée contre les courts-circuits et les surcharges avec des fusibles dédiés. Par exemple, nous pouvons utiliser pour notre application un fusible OHEV040 (40A) de Littelfuse, spécifié avec une résistance interne d'environ 2 mΩ et une énergie de fusion de 1495 A<sup>2</sup>s. La longueur du câble entre les deux batteries est estimée à 2 m, soit une résistance d'environ 2 mΩ également. La résistance interne de chaque batterie est de 192 mΩ. Avec toutes ces hypothèses, le circuit équivalent est le suivant :

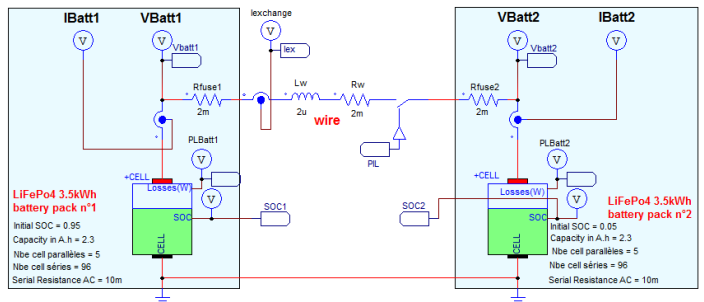


Fig. 4 Simulation de référence sans limitation de courant

Lors de la connexion des deux batteries, le courant échangé est supérieur à 100 A.

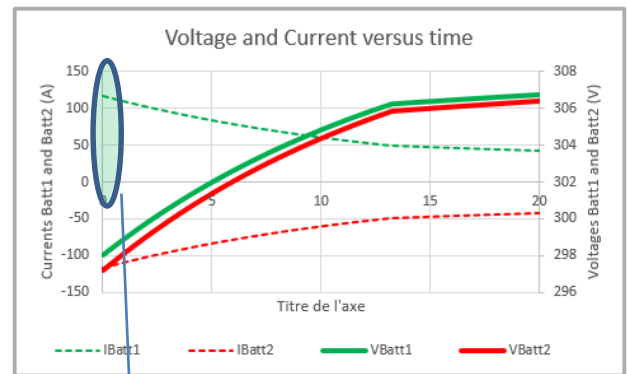
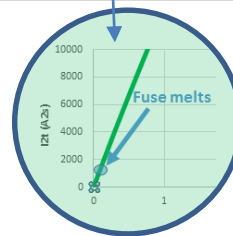


Fig. 5 Courbes de tension et courant des packs batterie



Ces simulations nous montrent que le courant est principalement limité par les résistances internes des batteries qui sont bien plus importantes que les résistances des câbles et du fusible. Sans aucun contrôle externe du courant, le fusible fond très rapidement en moins de 1s. Pour supporter ces courants, nous pourrions sur-dimensionner les fusibles pour permettre l'échange d'énergie. Mais ces niveaux élevés de courant génèrent des pertes thermiques à l'intérieur des batteries et ont un impact sur la durée de vie de la batterie.

Cette simulation permet de calculer le temps d'équilibrage et l'énergie dissipée :

- Temps d'équilibrage : 2600 s

- Energie échangée : 5147 kJ (1430 Wh)
- Energie dissipée dans les packs batteries : 160 kJ
- Energie dissipée dans les câbles : 1,8 kJ

#### 4.2. Solution 1 : Convertisseur DC/DC élévateur bidirectionnel

La première solution proposée pour échanger l'énergie met en œuvre deux convertisseurs élévateurs bidirectionnels qui peuvent également être utilisés en suiveur.

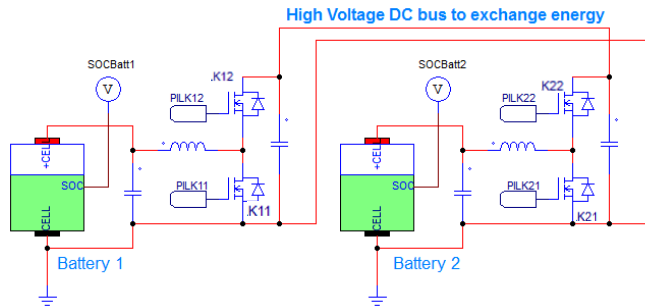


Fig. 6 Solution 1: DC/DC élévateur bidirectionnel

Dans notre cas, la tension de la batterie 1 est plus élevée que la tension de la batterie 2. Une solution peut être d'utiliser les transistors K22 et K21 en élévateur et les transistors K12 et K11 en suiveur (K12 fermé et K11 ouvert).

Dans cette configuration, le courant échangé entre les batteries est pleinement maîtrisé (ici le courant max de décharge, soit 11.5 A). Les tensions et les états de chargent s'équilibrent dans un temps dépendant de la valeur du courant.

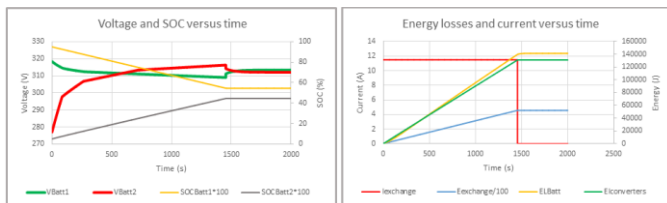


Fig. 7 Courbes comparatives - solution 1

Cette topologie ne permet pas de protéger les batteries en cas de court-circuit sur le bus haute tension à cause des diodes des transistors. En revanche ces diodes accroissent la disponibilité des batteries car il n'est pas nécessaire de piloter les transistors pour obtenir de l'énergie en décharge.

Avec un rendement estimé à 97.5 % (2 % de perte dans le convertisseur élévateur et 0.5 % de perte dans le convertisseur suiveur), on peut calculer le temps d'équilibrage et l'énergie dissipée :

- Temps d'équilibrage : 1455 s
- Energie échangée : 5200 kJ (1444 Wh)
- Energie dissipée dans les packs batteries : 141 kJ
- Energie dissipée dans les convertisseurs : 131 kJ

Pour le dimensionnement, la puissance maximale que voient les convertisseurs dépend de tension maximale de la batterie et du courant maximal échangeable entre batterie (ici 11.5 A), soit une puissance de :

- Puissance maximale du convertisseur : 3974 W

De la même manière, pour se donner un ordre de grandeur, on peut calculer la puissance moyenne transitant dans le convertisseur élévateur lors de la phase d'équilibrage :

- Puissance moyenne du convertisseur : 3532 W

Sans pouvoir donner de chiffres exacts de volume, de masse et de coût de tels convertisseurs, les puissances mentionnées ci-dessus permettent de se donner un ordre de grandeur pour comparer les solutions.

#### 4.3. Solution 2 : Convertisseur DC/DC abaisseur bidirectionnel

Dans la configuration avec deux convertisseurs abaisseurs en sortie de batterie, chacun d'entre eux est bidirectionnel et peut être suiveur.

Une solution de pilotage consiste à fermer K22, ouvrir K21 pour que le convertisseur de la seconde batterie soit configuré en suiveur, puis utiliser K12 et K11 pour faire une fonction abaisseur avec le convertisseur de la batterie 1.

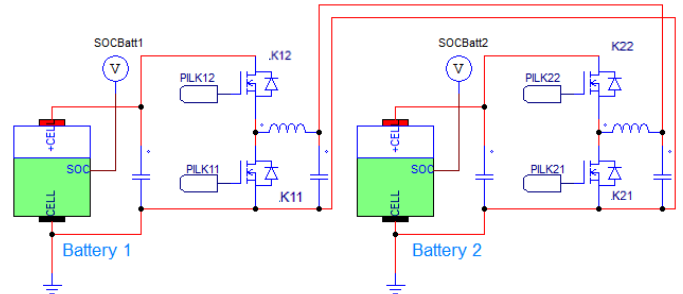


Fig. 8 Solution 2: DC/DC abaisseur bidirectionnel

Contrairement à la solution 1, il est possible ici d'utiliser les convertisseurs pour protéger les batteries contre un court-circuit sur le bus haute tension. En contrepartie, la disponibilité est mauvaise car il faut obligatoirement piloter un transistor pour avoir accès à l'énergie de la batterie en décharge.

Avec un rendement estimé similaire à la solution 1 (97.5 %), le temps d'équilibrage, les énergies échangée et dissipées ainsi que les puissances sont identiques :

- Temps d'équilibrage : 1455 s
- Energie échangée : 5200 kJ (1444 Wh)
- Energie dissipée dans les packs batteries : 141 kJ
- Energie dissipée dans les convertisseurs : 131 kJ
- Puissance maximale du convertisseur : 3974 W
- Puissance moyenne du convertisseur : 3532 W

#### 4.4. Solution 3 : Convertisseur isolé « basse puissance »

Le principe de cette solution consiste à dimensionner le convertisseur uniquement pour la puissance correspondant à la différence de tension entre les batteries. En effet, dans les solutions 1 et 2, les convertisseurs sont dimensionnés pour une puissance correspondant à la tension maximale de la batterie multiplié par le courant à échanger. Dans cette troisième solution les convertisseurs sont dimensionnés pour une puissance correspondant à la différence de tension (quelques volts) multiplié par le courant échangé. La puissance des convertisseurs est alors considérablement diminuée. Pour cela, un convertisseur isolé bidirectionnel est utilisé. Le secondaire du convertisseur est positionné en série avec la batterie pour compenser la différence de tension.

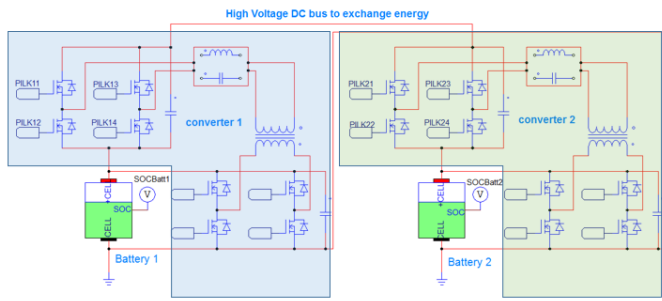


Fig. 9 Solution 3: DC/DC isolé bidirectionnel

De même que pour les solutions 1 et 2, ces convertisseurs peuvent être utilisés en bidirectionnel et en suiveur. Pour faire la fonction suiveur, il suffit de fermer les quatre transistors du secondaire des convertisseurs et de laisser ouvert les quatre transistors du primaire.

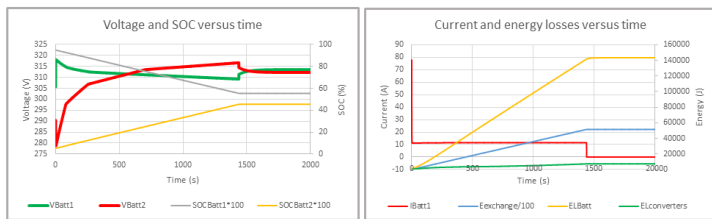


Fig. 10 Courbes comparatives - solution 3

Les courbes montrent que les pertes dans les convertisseurs sont faibles par rapport à l'énergie échangée entre les batteries. Les pertes principales sont localisées aux niveaux des batteries.

Dans notre cas, au début de l'échange, seul le convertisseur de la batterie 2 est utilisé pour compenser la différence de tension tout en limitant le courant. Pendant cette première phase, le convertisseur de la batterie 1 est en mode suiveur. Cette première phase se termine lorsque la différence de tension est trop faible pour obtenir le courant maximal d'échange. Le convertisseur de la batterie 1 est alors piloté à son tour pour créer une différence de tension « artificielle » suffisante pour obtenir le courant maximal d'échange (ici 11.5 A). Ainsi on continue à administrer à la batterie 2 un courant constant. Cela permet de minimiser le temps d'équilibrage. Les courbes de puissance instantanée et moyenne dans les convertisseurs sont présentées sur la figure 11 :

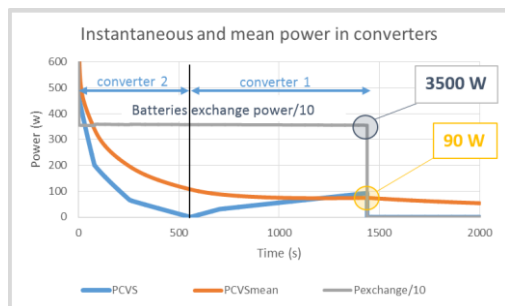


Fig. 11 Courbes de puissance dans les convertisseurs - solution 3

Dans notre cas, le pic de puissance transiant dans les convertisseurs est d'environ 600 W en début de phase, mais la puissance moyenne est de moins de 100 W à la fin de l'équilibrage.

- Puissance maximale du convertisseur : 600 W
- Puissance moyenne du convertisseur : 90 W

On gagne un facteur 6.5 en dimensionnement par rapport aux solutions précédentes.

Avec un rendement estimé à 95 % (5 % de perte dans les convertisseurs en fonctionnement et en considérant 10 mΩ de résistance interne dans les transistors fonctionnant en mode suiveur), on calcule le temps d'équilibrage et les énergies échangées et dissipées :

- Temps d'équilibrage : 1438 s
- Energie échangée : 5150 kJ (1430 Wh)
- Energie dissipée dans les packs batteries : 143 kJ
- Energie dissipée dans les convertisseurs : 7.2 kJ

On remarque que l'énergie dissipée dans les convertisseurs est très faible par rapport aux solutions précédentes.

Du fait de la présence des diodes des transistors, la disponibilité de l'énergie de la batterie est excellente, mais il est impossible de limiter la puissance en cas de court-circuit.

#### 4.5. Solution 4 : Régulation linéaire

Dans des systèmes de forte puissance, une régulation linéaire est souvent prohibée à cause de la forte dissipation d'énergie engendrée. Mais dans le cas précis d'utilisation d'accumulateur de technologie Lithium Fer Phosphate, la courbe de tension de l'accumulateur a une forme assez « plate ». Il y a donc peu de différence de tension à compenser. Cette hypothèse est à pondérer en fonction du nombre d'accumulateurs associés en série. Dans le cas de figure du projet ESPRIT, la tension maximale à compenser entre deux batteries est d'environ 40 V lorsque les batteries sont déséquilibrées.

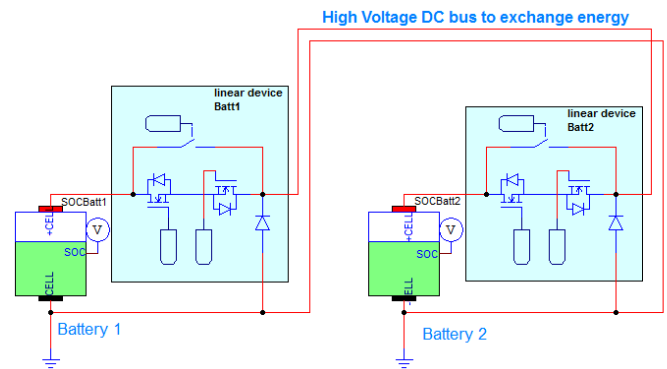


Fig. 12 Solution 4 : Régulateur linéaire

Deux transistors têtes bêtes sont pilotés en linéaire en fonction du courant les traversant. Une diode de roue libre est placée en sortie du convertisseur pour se prémunir de l'énergie emmagasinée dans l'inductance de câblage lors de l'ouverture complète des transistors. Enfin un interrupteur est placé en parallèle des transistors pour avoir une fonction « suiveur » à faible perte.

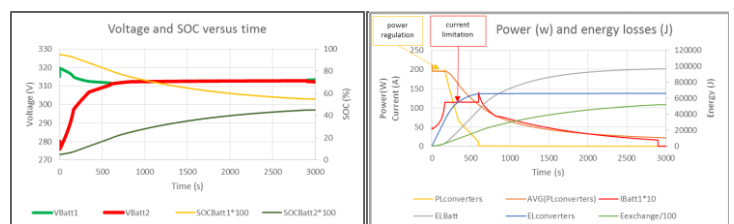


Fig. 13 Courbes comparatives - solution 4

Dans cette solution l'énergie du convertisseur est entièrement dissipée. De manière à avoir une température de transistor maîtrisable, on bride la puissance échangée à 200 W.



La courbe orange de la figure 13 présente l'évolution de la puissance moyenne dans le convertisseur. Elle est dans un premier temps bridée à 200 W, puis lorsque la différence de tension est trop faible pour obtenir un courant équivalent à 200 W, la puissance diminue naturellement. La puissance moyenne dissipée sur la totalité de l'équilibrage est de seulement 22.7 W. On remarque que la puissance est bridée durant environ 250 sec. Pour gagner du temps, on peut imaginer brider la puissance à une plus haute valeur. On pourra gagner au maximum 250 sec de temps d'équilibrage (sur 2900). Soit environ 9 % du temps. Mais il faudra alors prendre beaucoup de précaution quant à la dissipation de l'énergie.

Pour cette dernière configuration, le temps d'équilibrage et les énergies échangées et dissipées sont les suivantes :

- Temps d'équilibrage : 2900 s
- Energie échangée : 5177 kJ (1438 Wh)
- Energie dissipée dans les packs batteries : 96 kJ
- Energie dissipée dans les convertisseurs : 66 kJ
- Puissance maximale du convertisseur : 200 W
- Puissance moyenne du convertisseur : 22.7 W

Le temps d'équilibrage est nettement plus long que dans les autres solutions. Cela s'explique du fait qu'il est impossible avec cette solution de créer une différence de tension artificielle entre la batterie 1 et la batterie 2 pour accélérer l'échange d'énergie. Néanmoins, cette solution comporte plusieurs avantages. Elle semble simple à mettre en œuvre, l'énergie dissipée n'est pas aussi importante qu'on pourrait l'imaginer et surtout elle permet de limiter le courant dans les batteries en cas de court-circuit sur le bus haute tension.

Il est possible, avec cette solution, de protéger la batterie d'un court-circuit (à condition de dimensionner les transistors pour tenir la tension du pack batterie). En revanche il faut toujours piloter un composant pour décharger la batterie, ce qui ne va pas dans le sens de la disponibilité.

## 5. TABLEAU COMPARATIF

(*) : non applicable	Référence sans limitation de puissance	Solution 1 DC/DC élévateur	Solution 2 DC/DC abaisseur	Solution 3 Convertisseur isolé	Solution 4 Régulation linéaire
Puissance Max / Moyenne des convertisseurs (W)	Pas de limite	3974 / 3532	3974 / 3532	600 / 90	200 / 23
Pertes batteries (kJ)	160	141	141	143	96
Pertes convertisseurs (kJ)	1.8	131	131	7.2	66
Energie échangée (kJ)	5147	5200	5200	5150	5177
Rendement moyen estimé	NA(*)	97.5	97.5	99,8 %	98.7
Temps d'équilibrage	2600	1455	1455	1438	2900
Complexité	NA(*)	☺	☺	☹	☺
Limitation en court-circuit	Non	Non	Oui	Non	Oui
Disponibilité	☺☺	☺	☹	☺☺	☹
Volume, masse, coût	NA(*)	☺	☺	☺	☺

Tab. 1 Tableau comparatif des solutions étudiées

## 6. CONCLUSION

Dans cet article, nous comparons 4 solutions pour échanger de l'énergie entre pack batterie lithium fer phosphate (LiFePO4) haute tension. Un cas d'application concret est pris en exemple pour étudier les avantages et inconvénients. Deux de ces solutions sont intéressantes dans l'application. La solution 3 à convertisseur isolé présente un rendement très favorable et c'est certainement la plus compacte par rapport aux autres solutions. Le seul inconvénient des convertisseurs isolés est l'incapacité à protéger les batteries contre un court-circuit sur le bus haute tension. La solution 4 à régulateur linéaire est intéressante de par sa simplicité de mise en œuvre et contrairement à ce qu'on pourrait penser d'un premier abord, elle présente un rendement supérieur à des solutions classiques à base de convertisseurs élévateur ou abaisseur (solution 1 et 2). Cela est dû à la spécificité des batteries LiFePO4 qui ont une courbe de tension de forme « plate ». La différence de tension à compenser entre une batterie chargée et une batterie déchargée est faible. En revanche l'aspect thermique doit être étudié en détail pour obtenir une solution performante.

## 7. REFERENCES

- [1] Jiunchun Jiang, "Topology of a bidirectional grid converter for energy interaction between electric vehicles and the grid", *Energies* 2014, 7, 4858-4894