

Gestion de la Charge de Batteries Lithium (BMS)

¹ I.U.T de l'Aisne Département Génie Electrique SOISSONS FRANCE
Laboratoire pour l'Innovation Technologique (L.T.I)

Cette ressource fait partie du N° 112 de La Revue 3EI du 2^{ème} trimestre 2024.

Bien que largement répandus, les chargeurs de batterie lithium restent difficiles à caractériser et leur qualité sujette à questions. En effet, les caractéristiques des cellules des accumulateurs présentent des disparités relativement importantes fonction de leurs vieillissements et des chimies employées et changent en fonction de l'état de charge et de la température. A cause de ces disparités, l'équilibrage est nécessaire et doit se faire en toute sécurité et à faible coût. Il est alors nécessaire de maîtriser cet équilibrage quelle que soit la résistance interne des éléments, l'intensité du courant de charge, la tension d'alimentation du chargeur, la température de fonctionnement. Dans cet article, nous proposons une étude basée sur des simulations qui permet de se faire une idée claire des performances des chargeurs et des améliorations que l'on peut en attendre.

1 - Introduction

La durée de charge des batteries dépend des caractéristiques des éléments de l'accumulateur et de la gestion de ces éléments par le BMS (Battery Management System). Le BMS permet de stopper la décharge ou la charge lorsqu'un élément est respectivement en dessous de la tension critique ou au-dessus de sa tension de seuil. De même, si le courant dépasse une certaine valeur limite destructrice pour l'accumulateur, le BMS interrompt la décharge de l'accumulateur. Par mesure de sécurité, un fusible surdimensionné est utilisé au cas où l'interrupteur statique (plusieurs transistors en parallèles) du BMS se retrouve en court-circuit après un défaut.

La grandeur physique qui permet de déterminer l'arrêt de la charge ou de la décharge est en général la tension de la batterie. En effet, la mesure des résistances internes de chacun des éléments étant rarement gérée par les BMS, la tension électrochimique OCV (Open Circuit Voltage= E_B) ne peut être utilisée.

Les caractéristiques électriques de chaque élément de l'accumulateur (tension électrochimique, résistance et capacité internes) évoluent en fonction du nombre de cycles de charge et de décharge, donc de leur état de santé (SoH : State of Health) [1] mais aussi en fonction de la température et de l'état de charge (SoC : State of Charge). Ainsi, le courant de charge maximal dépend de l'évolution de la tension électrochimique de l'accumulateur, des résistances internes de chaque élément R_B , de la résistance du câble R_C .

Le courant de charge limite en mode CC s'exprime ainsi de la manière suivante [2] :

$$I_{\text{limit}} = \frac{U_{\text{a lim entation}} \cdot \text{PWM} - \sum E_B(\text{SoC}, ^\circ\text{C})}{\sum R_B(\text{SoC}, ^\circ\text{C}) + R_C} \quad (1)$$

La régulation de courant de charge CC est nécessaire pour limiter le courant du chargeur. Pour préserver la durée de vie des éléments, le courant de décharge est en général préconisé par les fabricants à 3C pour la technologie Lipofer, NCM et à 6C pour LTO, Na-ion.

De plus, tous les BMS assurent la sécurité thermique de l'accumulateur par l'intermédiaire de plusieurs capteurs de température. En général, le paramétrage de la température max est fixé à 50°C. Ainsi le courant de consigne de la charge est limité par la nécessité de la régulation de température (CT). Une communication entre le BMS et le chargeur est alors nécessaire pour adapter la consigne de courant. Sans cette liaison, le BMS interrompt arbitrairement le courant de la batterie pour une valeur de température de 50°C (charge en tout ou rien).

La tension d'alimentation fournie par le chargeur correspond classiquement à la somme des tensions de seuil de chaque élément série. Lorsque le rapport cyclique de la PWM est égal à 1, le courant diminue naturellement en fonction de la variation de la somme de la tension E_B et correspond à la charge à tension constante (CV). Cependant, avec une tension d'alimentation plus importante, le courant de consigne pourra être plus élevé et diminuer ainsi la durée de charge [3, 5].

Le passage du mode CC au mode CV permet de définir l'état de charge SoC_{CV} par l'équation (2) qui dépend du courant de charge en CC, de la résistance interne du chargeur et de manière indépendante de la résistance interne de la batterie.

$$SoC_{CV} \approx \frac{U_{a\lim} - \sum E_B(SoC, ^\circ C) - I_{\lim} \cdot R_C}{U_{a\lim} - \sum E_B(SoC, ^\circ C)} \quad (2)$$

Tous les BMS passifs fonctionnent de la même manière. Dès qu'il y a un élément de l'accumulateur qui atteint la tension de seuil, il y a une déviation du courant de charge via une résistance et vers une LED qui permet d'indiquer visuellement quels sont les éléments qui ont atteint cette tension de seuil et de signaler le moment où l'équilibrage est atteint pour toutes les cellules (tous les éléments sont chargés à leur tension de seuil). Si la tension de l'élément devient trop grande (tension de seuil plus une hystérésis) alors le courant de charge doit être coupé.

En fonction de la chimie et du nombre de cycles, des différences entre chaque élément série peuvent atteindre de plus de 10% sur le SoH (State of Health) et plus 400% sur la résistance interne. Ceci engendre pendant l'équilibrage, une commutation tout ou rien de l'alimentation du chargeur de fréquence relativement élevée dépendant du courant de charge, du courant de déviation, de la résistance interne de chaque élément et de l'hystérésis entre la tension de seuil et la tension maximale choisie.

Dans cet article, nous nous intéressons à la charge et l'équilibrage de petits accumulateurs dont l'énergie est inférieure à 2000 W.h et qui correspondent à des véhicules à faible consommation d'énergie ou à des équipements électroportatifs. Les simulations proposées ici permettent d'analyser le comportement du programme du microcontrôleur d'un BMS numérique, tâche difficile à réaliser en pratique.

2 - Chargeur à courant constant et BMS tout ou rien

A ce jour, certains BMS communiquent avec le chargeur (Bluetooth, bus CAN, I2C ...) pour améliorer la sécurité et optimiser la charge [4]. De plus, pour des applications aux véhicules électriques cette fonctionnalité commence à être utilisée dans le cadre d'un délestage résidentiel (chargeur Renault 5 via la technologie V2G vehicle-to-grid).

Cette communication permet d'accéder aux données de la batterie que sont :

- la tension de chaque élément série permettant de vérifier l'état de l'équilibrage,
- la température,
- la résistance interne ESR « equivalent series resistance »,
- l'autodécharge de chaque élément,
- l'estimation du SoH,
- et de la capacité restante.

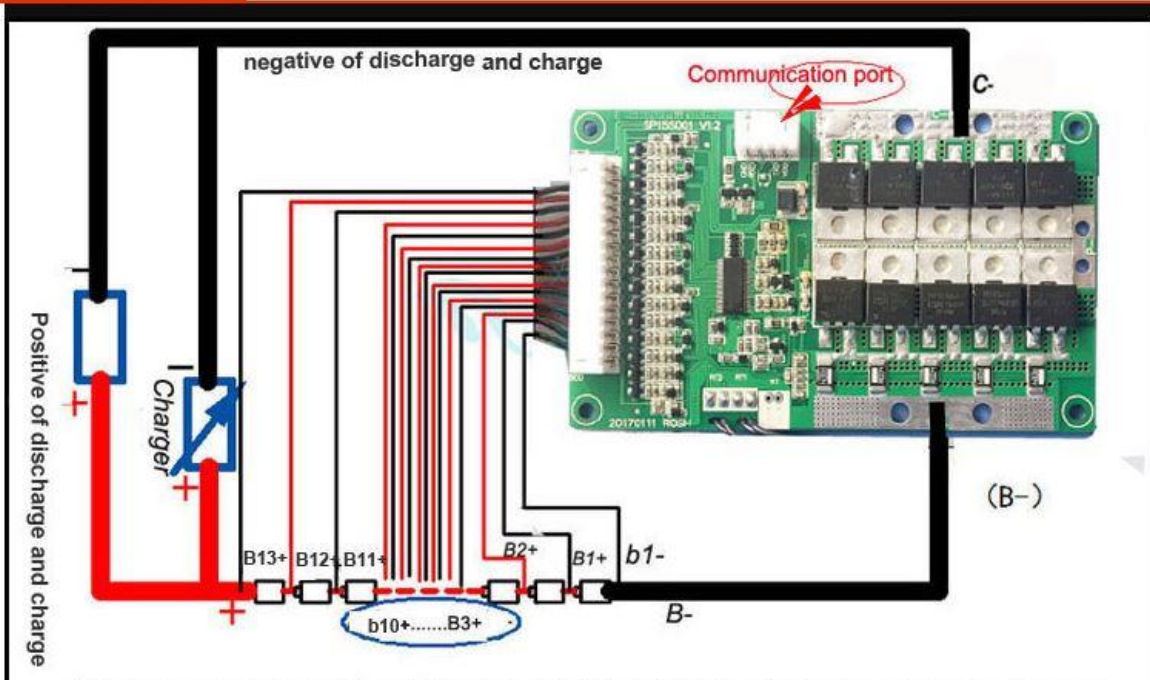


Figure 1 : BMS avec le faisceau de mesure des tensions de chaque élément de l'accumulateur et les 10 transistors MOS TO252 pour une charge ou décharge max de 40A.

Le Bluetooth permet par exemple, de collecter les données et de visualiser les courbes caractéristiques d'une batterie sur son smartphone ou PC.

Sur la figure 2, le schéma fonctionnel classique d'un BMS pour batterie lithium est présenté. Le courant d'équilibrage est limité par les transistors et les résistances nommées CBx.

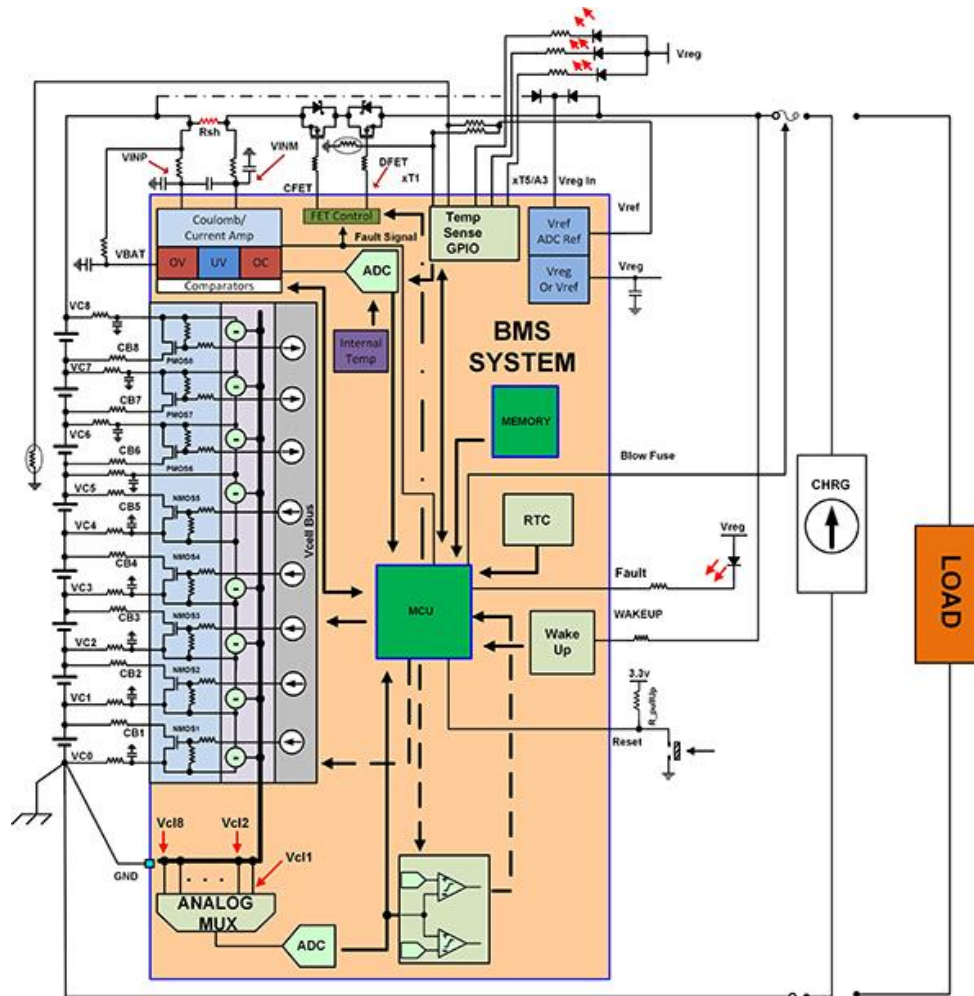


Figure 2 : Intersil BMS ISL194203 avec charge et décharge sur la même entrée, CAN 12 bits, programmable, 8€ [6].

Pour simplifier les explications sur la problématique du BMS tout ou rien, les simulations présentées dans cet article ne comportent que 2 éléments Lipofer dont la tension de seuil est fixée à 3,7 V. La tension de coupure du BMS a été choisie arbitrairement à 3,72 V.

En pratique, l'hystérésis entre la tension maximale et la tension de seuil correspond à un décalage de 0,05 V. Le courant de déviation (équilibrage) est de 1A entre les 2 tensions précitées.

La tension d'alimentation du chargeur a donc été fixée à une tension de 3,72 V x 2.

Les 2 éléments Lipofer possèdent une capacité de 20 A.h avec un courant de charge régulé inférieur à 10 A. La tension électrochimique pour un SoC nul est de 2,5V. Si la résistance du chargeur est de 0,044 Ω, alors la régulation CC cessera à 81% (16,3A.h) pour basculer en régulation CV.

$$SoC_{CV} = \frac{2 \times 3.72V - 2 \times 2.5V - 10A \times 0.044\Omega}{2 \times 3.72V - 2 \times 2.5V} = 81\% \quad (3)$$

Pour la simulation, l'évolution de la tension électrochimique de la batterie (OCV) est supposée être une fonction linéaire de la capacité énergétique (équation (4)) :

$$E_B = \left[E_{B\text{seuil}(SoC=100\%)} - E_{B(SoC=0)} \right] \cdot \frac{\text{Capacity}}{20A.h} + E_{B(SoC=0)} \quad (4)$$

La tension de chaque élément correspond au modèle simplifié électrochimique d'une batterie :

$$U_B = E_B + R_B \cdot I_B \quad (5)$$

L'algorithme du BMS est relativement simple :

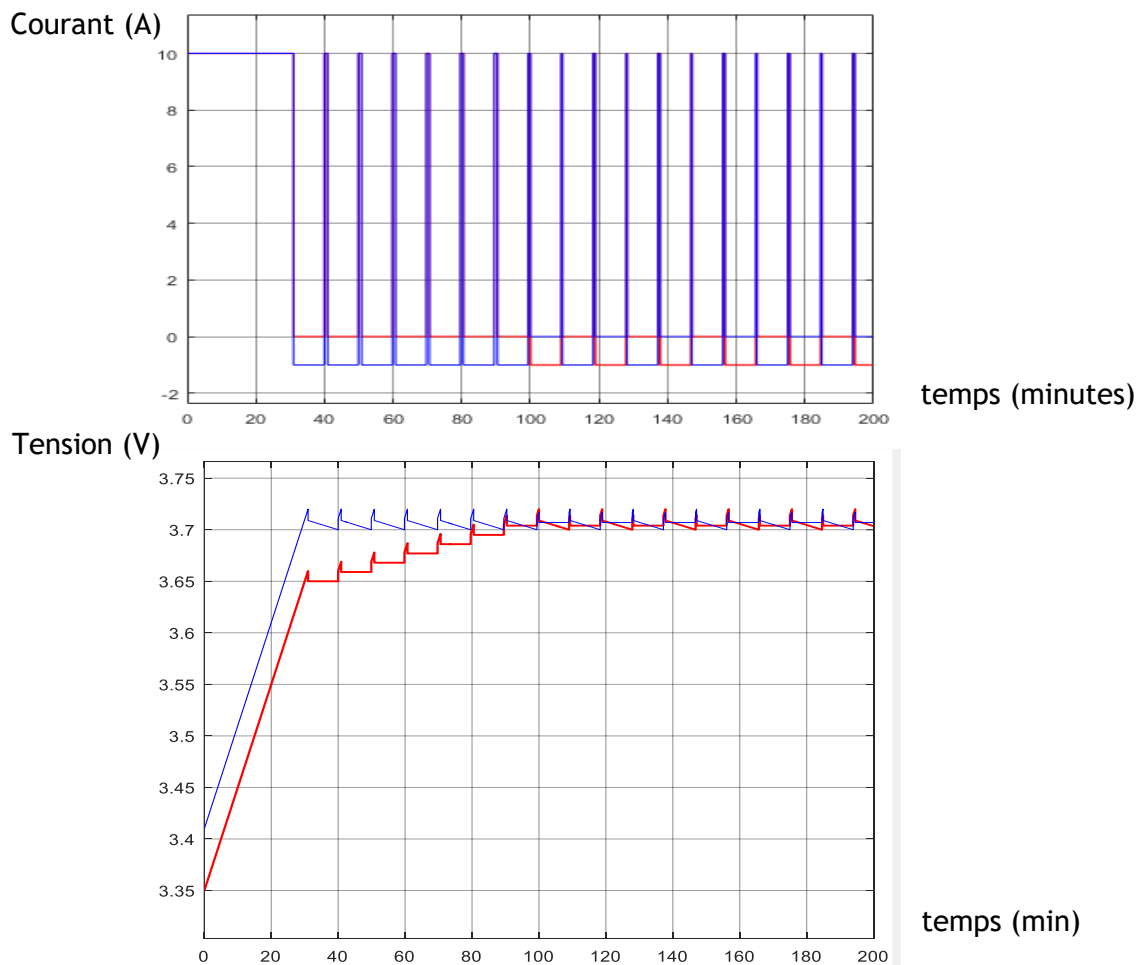
(x correspond à une des cellules séries de l'accumulateur)

- si $UB_x > 3,7V$ il y a équilibrage, le courant dévié de la cellule est de $1A (= UB_x / \text{Resistance})$
- si un des éléments est $UB_x > 3,72V$, arrêt de charge de l'élément
- si, toutes les cellules $UB_x \geq 3,7V$, arrêt du chargeur

Sur la figure 3, la charge et les commutations du courant se font avec tous les éléments de même résistance interne (1 mΩ), mais un déséquilibre de 1A.h est à noter entre les éléments 1 et 2 (courbe de la capacité). La périodicité des commutations du courant est fonction de la pente de l'équation 4 et donc de la valeur de la consigne du courant ainsi que la valeur du courant de déviation et de l'hystérésis choisie sur la tension.

Sur l'évolution des capacités des deux éléments de la figure 3, le rattrapage du déséquilibre de 1.A.h est atteint en 1 heure (équation (6)) avec un courant moyen de décharge de 1A.

$$\Delta Q(A.h) = I_{\text{moy}} \cdot \text{temps}(h) \quad (6)$$



Capacité (A.h)

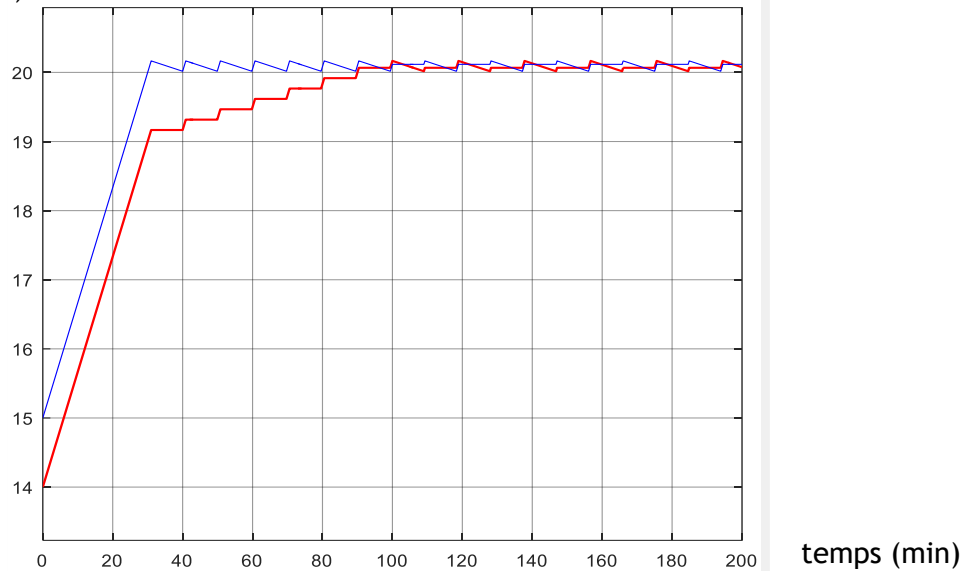


Figure 3 : Intensité, tension et capacité énergétique en fonction du temps de 2 éléments (rouge et bleu) d'une batterie avec un déséquilibre de 1 A.h.

La perte de puissance due à l'équilibrage est donnée par l'équation (7) :

$$P_{\text{perdue}} (\text{W}) = (\text{nb}_{\text{elements}} - 1) \cdot E_{\text{Bseuil}} \cdot I_{\text{déviié}} = 3,7 \cdot 1\text{A} = 3,7\text{W} \quad (7)$$

L'énergie perdue, quant-à-elle, dépend de la somme des équilibrages de chaque cellule :

$$W(\text{W.h}) = \sum E_{\text{B}} (\text{V}) \cdot \Delta Q(\text{A.h}) \quad (8)$$

Avec des éléments lipofer, le phénomène de relaxation de la tension entraîne une diminution de la tension à 3,45V en une heure et 3,42V au bout de 24h. Par conséquent, sans mémorisation de l'arrêt de charge par le BMS, la charge est à nouveau active inutilement.

En général, l'autodécharge des éléments est inférieure à 1% par mois mais pour des cellules âgées, l'autodécharge peut atteindre une dizaine de pourcents par mois. La « mémoire » de fin d'équilibrage bloque la charge due à l'autodécharge mais si la tension d'un élément est inférieure à une certaine valeur (par exemple 3,35V), la mémoire de fin de charge doit être remise à zéro.

Les résistances internes sont la cause de la présence de pics de tension de 10 mV (10 A et 1 mΩ) (figure 3) dont l'intensité reste négligeable par rapport à l'hystérésis choisie.

En revanche, si la résistance interne augmente (par exemple à 4 mΩ), on observe que les pics de tension sur l'élément 2 sont relativement importants (figure 4). Cette simulation est obtenue pour un même déséquilibre de 1 A.h entre les 2 éléments et la résistance du connecteur du chargeur est choisie arbitrairement à 6 mΩ (valeur nominale d'un connecteur Anderson de 5mm).

La durée de l'équilibrage est légèrement plus longue que dans le cas précédent sans être trop pénalisante. En effet, comme le courant diminue lorsque la tension des 2 éléments est proche de la tension de seuil, les pics de tension s'amenuisent et l'équilibrage s'effectue correctement mais plus lentement.

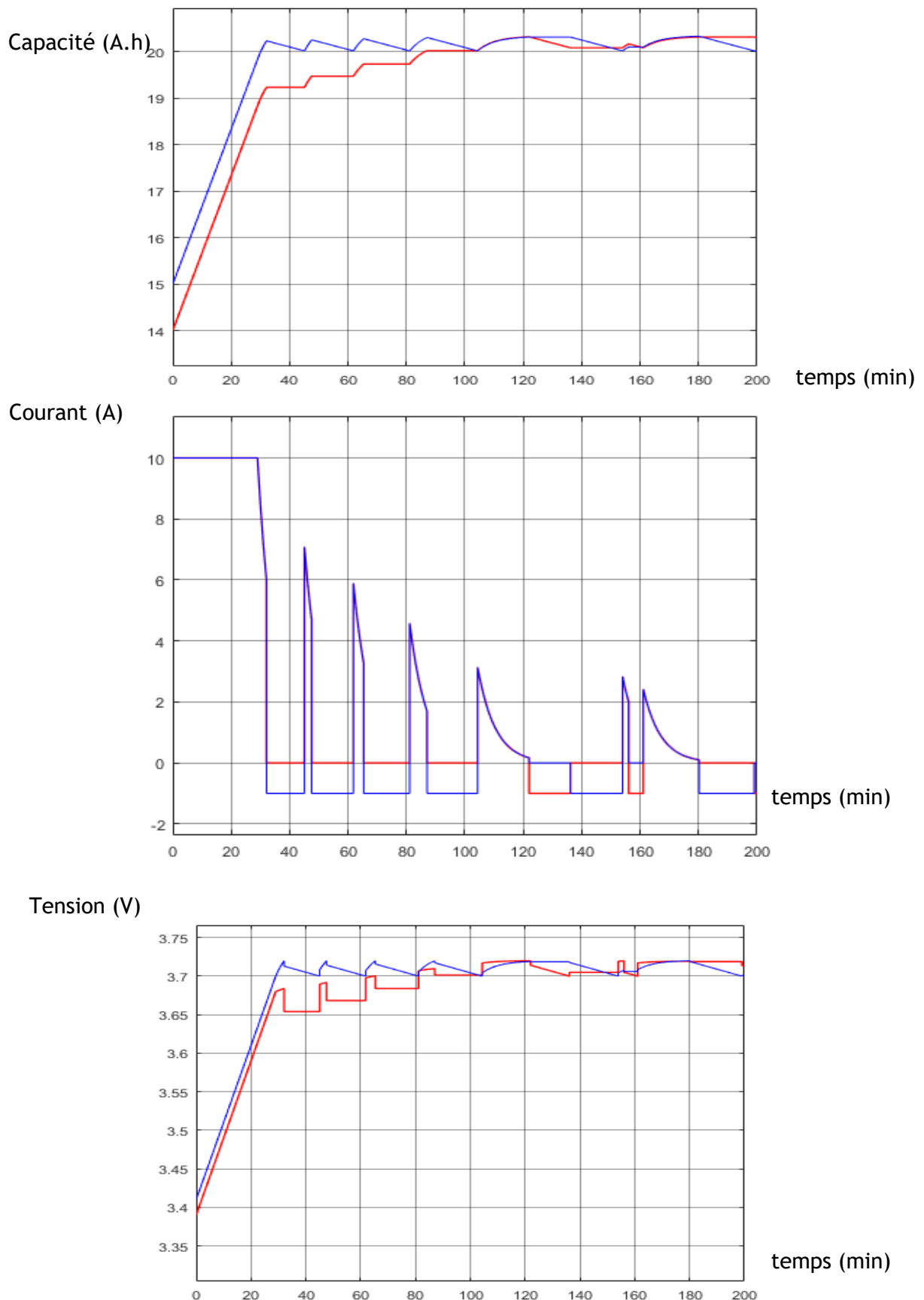


Figure 4 : Intensité, tension et capacité énergétique élément 1 et 2 avec un déséquilibre de 1A.h, une résistance interne de $4m\Omega$ sur l'élément 2 et une résistance RC (Résistance de Connexion) de $6 m\Omega$.

La simulation dont les résultats sont présentés sur la figure 5, correspond au même cas de figure que précédemment mais avec une résistance de connexion choisie arbitrairement à $44 m\Omega$. Dans ce cas, la durée de charge à courant de charge constant, correspond à 81% du SoC (équation 3).

Par conséquent, la durée de charge et l'équilibrage sont bien plus longs.

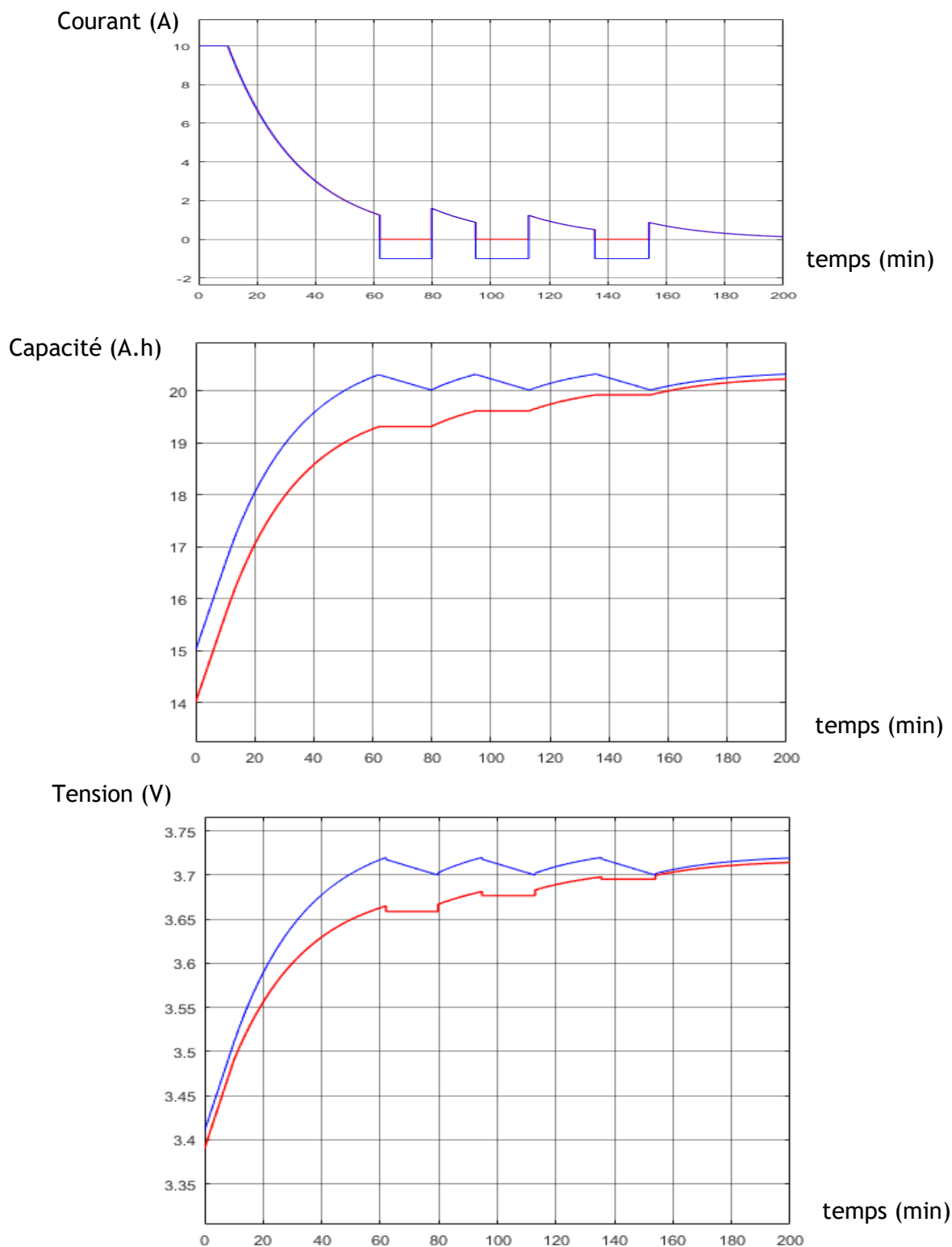


Figure 5 : Intensité, tension et capacité énergétique élément 1 et 2 avec un déséquilibre de 1A.h, une résistance interne de 4mΩ sur l'élément 2 et une résistance de connexion RC de 44 mΩ.

Pour minimiser l'impact de la résistance de connexion et réduire la durée du mode à tension constante, les chargeurs puissants ont une tension d'alimentation bien supérieure à la somme des tensions de seuils des cellules. Dans ce cas, un réglage précis de la PWM est nécessaire pour obtenir la consigne de courant souhaitée.

Sur la figure 6, la consigne de courant est de 18 A, la période est relativement faible avec l'hystérésis choisie arbitrairement à 0,02 V.

On peut noter que pour des courants de consigne un peu plus élevés, alors les commutations sont bien plus nombreuses et la période d'échantillonnage du courant d'un BMS numérique (microcontrôleur) peut être dépassée alors que les BMS utilisant des circuits analogiques n'ont pas ce problème d'échantillonnage.

Avec cette consigne de courant de 18A, le temps de charge est relativement rapide mais le temps d'équilibrage reste inchangé.

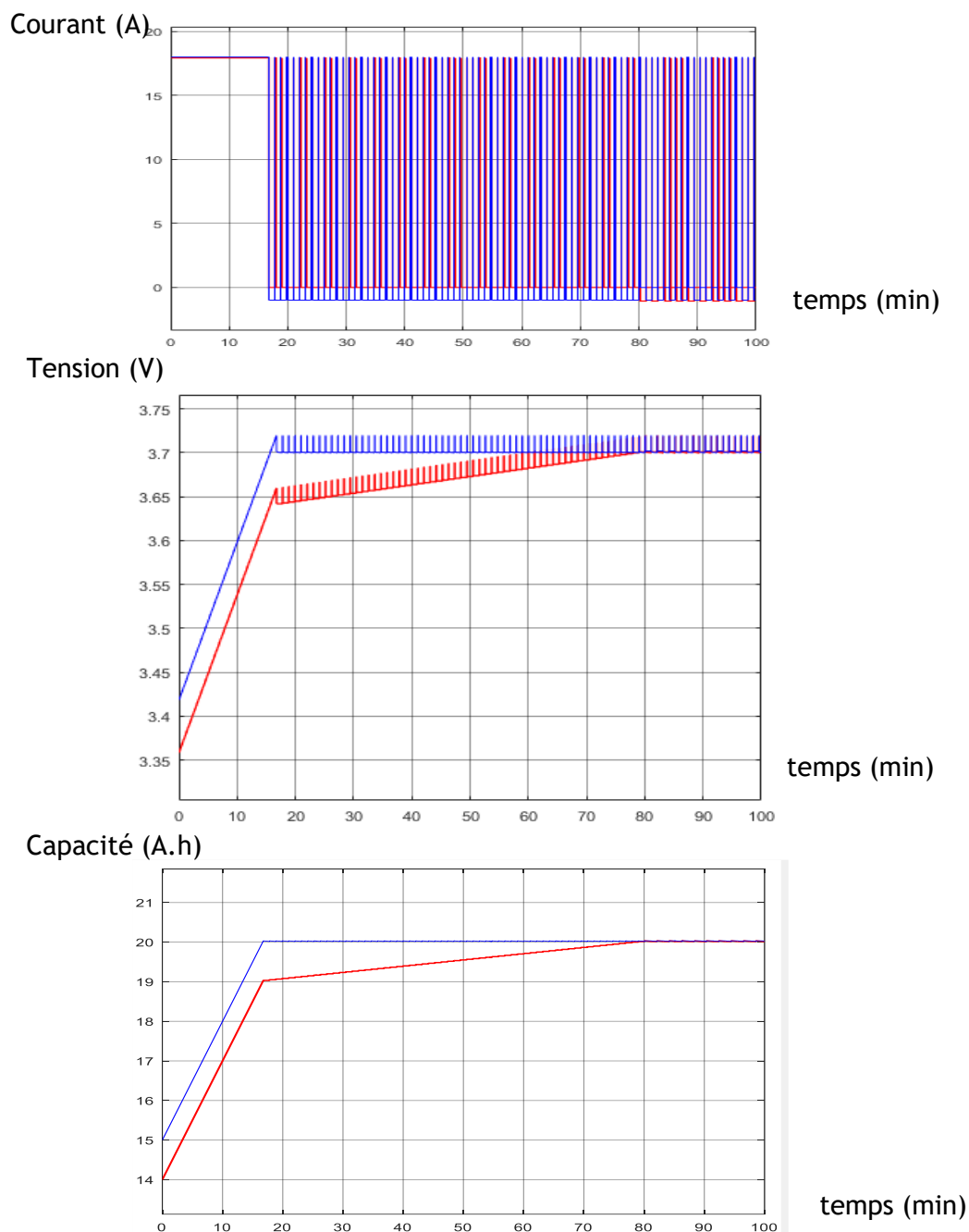


Figure 6 : Intensité, tension et capacité énergétique élément 1 et 2 avec un déséquilibre de 1 A.h et une résistance des différents éléments de 1 mΩ avec courant de 18A.

Pour minimiser le nombre important de commutations lors de l'équilibrage, on fixe la consigne du courant du chargeur pour qu'elle soit identique à la valeur du courant dévié de l'équilibrage. Il est alors nécessaire que le BMS puisse indiquer l'état de l'équilibrage au chargeur. De plus, pour un

faible courant de charge, la résistance interne de chaque élément a moins d'influence sur la fréquence de détection de la tension max synonyme de l'arrêt de la charge.

Notons qu'à chaque charge, il n'est pas obligatoire de faire un équilibrage de la capacité énergétique car celle-ci est en général bien inférieure à 1%. Mais le déséquilibre de la capacité énergétique de l'élément de plus grande résistance interne s'accroît et l'autonomie du système s'en trouve fortement dégradée car la coupure de la batterie par le BMS est basée sur la capacité énergétique de l'élément le plus faible. Remarquons que bien qu'un équilibrage tous les 30 cycles est en général un bon compromis, les BMS commercialisés ne permettent pas à l'utilisateur de faire ce choix.

A ce jour, les BMS passifs proposent des équilibrages pour des courants très faibles (en général inférieur à 0,05A même pour des batteries de 20A.h). L'équilibrage peut donc être très long si le déséquilibre est profond [9].

Pour éviter la déperdition thermique due au BMS passif, il est possible de charger l'accumulateur élément par élément. C'est une des solutions d'équilibrage rapide réalisée avec un chargeur isolé par cellule. Dans ce cas, le faisceau de fils de chaque cellule doit posséder une section correcte et la connectique doit être adaptée. Pour charger à 10A, une section de 1,5 mm² est acceptable, pour les intensités plus grandes, cela devient plus difficile.

On notera qu'il existe de l'équilibrage actif avec un seul chargeur associé à un multiplexage permettant ainsi une alimentation élément par élément [7]. Les autres solutions d'équilibrage actif comme le transfert de charge par capacité tel que le LTC3305 via des capacités de 1mF n'est pas encore à ce jour très démocratisé chez les fabricants de BMS [8]. En revanche, l'équilibrage actif inductif avec le circuit ETA3000 pour des courants de 0.2A à 1A commence à être fréquemment distribué [12].

La figure 7 donne un exemple de BMS passif avec équilibrage à 0,03A et actif à 1A en option.

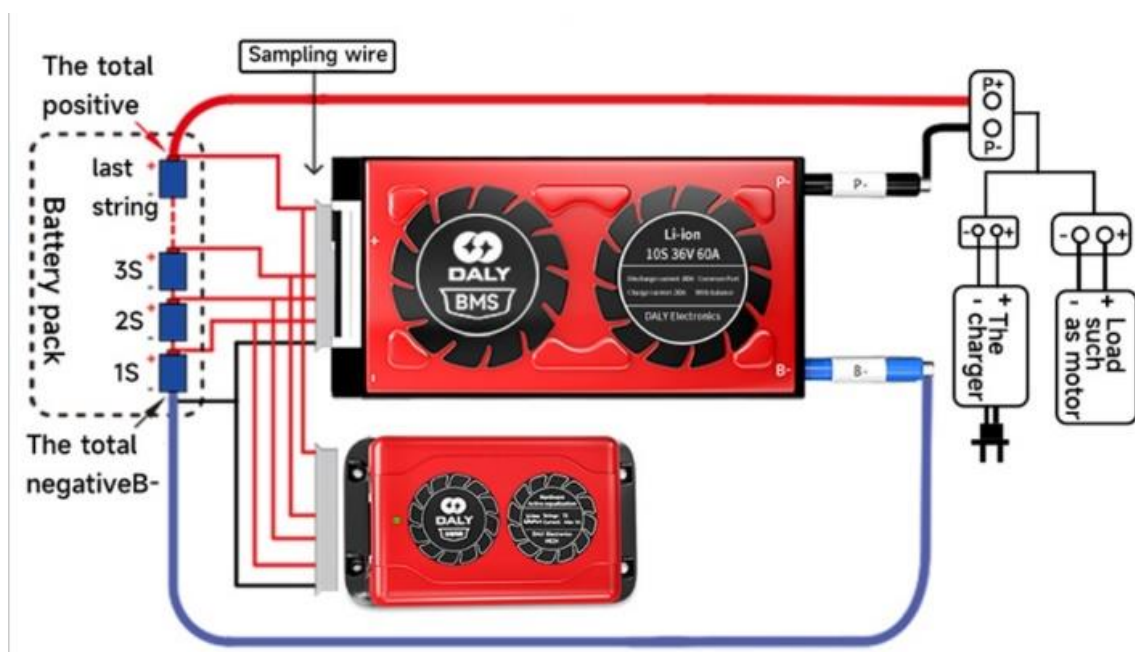


Figure 7 : BMS passif et actif [10]

Pour les BMS numériques, les « firmware updates » sont rarement « open source ». Les modifications du paramétrage des BMS et des méthodes de mesures et d'estimation de modèle sont alors difficiles. Par ailleurs, la production à grande échelle des BMS engendre des prix bas et

explique d'une part que les BMS sont rarement réparés et d'autre part que leurs schémas électriques sont rarement disponibles.

En revanche les BMS « open source » réalisés par des passionnés sont facilement réparables et reprogrammables [11].

3 - Efficacité et norme d'un chargeur

La réglementation UE fixe des limites à la pollution harmonique afin d'améliorer le facteur de puissance (EN61000-3-2 (basée sur la norme CEI 61000-3-2) des chargeurs. Ainsi, toutes les alimentations à découpage dont la puissance de sortie est supérieure à 75 Watt doivent inclure une correction du facteur de puissance.

En pratique, c'est rarement le cas, même pour des puissances de 1500W (72V, 20A) dont le facteur de puissance est d'environ de 0,6.

En revanche, avec un rendement d'environ 90% en charge et des pertes en fonctionnement à vide égales à 3% de la puissance maximale les chargeurs ne nécessitent en général pas de système de mise en veille automatique propre. Toutefois, le nombre de chargeurs par foyer augmentant, l'option de la veille reste intéressante pour réaliser des économies d'énergie.

4 - Durée de charge

La durée de charge dépend de la chimie, du courant de charge et de la déperdition thermique.

Les batteries lithiums Lipofer, Lipo et Li-ion, peuvent se charger à 1C jusqu'à 80% (donc en 0,8 h avec un SoC de départ de 0%) pour une température ambiante de 40°C. Les 20% de charge restantes peuvent durer assez longtemps (environ 1h) selon la nécessité d'équilibrage des cellules.

La durée de charge inférieure à 1C est donnée par les relations (9, 10) suivantes en fonction de la puissance ou du courant.

$$\text{durée}_{\text{charge}} \approx \frac{(\text{SoC}_{\text{final}}(\%) - \text{SoC}_{\text{initiale}}) \cdot Q_{\text{no min al}}(\text{A.h}) \cdot V_{\text{batterie}}}{\text{Puissance}_{\text{charge}}(\text{W})} \quad (9)$$

$$\text{durée}_{\text{charge}} \approx \frac{(\text{SoC}_{\text{final}}(\%) - \text{SoC}_{\text{initiale}}) \cdot Q_{\text{no min al}}(\text{A.h})}{I_{\text{charge}}(\text{A})} \quad (10)$$

Pour la batterie précédente et pour des températures ambiantes de plus de 15°C, les pertes thermiques avec un courant de 20A provoquent une augmentation de la température de 5°C. En comparaison, à 0°C l'augmentation de la température est de 13°C car la résistance interne de la batterie est plus grande. Une température ambiante de 40°C entraîne l'arrêt de la charge par le BMS.

L'évolution du courant de charge jusqu'au basculement en mode CV est donnée par la relation 11 dans laquelle Q_{cv} représente la capacité énergétique du passage en mode CV et Q_f la capacité finale ou nominale de la batterie.

$$I_{(Q)} = \frac{I_{\text{limit}} \cdot (Q - Q_f)}{(Q_{\text{cv}} - Q_f)} \quad (11)$$

En mode CV, la capacité énergétique de la batterie ne varie plus proportionnellement au temps (comme dans le mode CC) mais de façon exponentielle :

$$Q(t) = Q_f + (Q_{cv} - Q_f) e^{-\frac{t \cdot I_{limit}}{Q_f - Q_{cv}}} \quad (12)$$

Théoriquement, il faudrait une durée infinie pour recharger à 100% mais la charge peut être considérée comme achevée lorsque la capacité atteint 95% de la valeur finale.

Finalement, la durée de charge totale à partir d'une capacité initiale est donnée par l'équation suivante :

$$\text{temps}_{\text{charge}} \text{ (h)} = \frac{Q_{cv} - Q_i}{I_{limit}} + \frac{Q_{cv} - Q_f}{I_{limit}} \ln \frac{(0.95 - 1)Q_f}{Q_{cv} - Q_f} \quad (13)$$

La charge avec la limitation du courant et prise en compte de la valeur du SoC_{cv} peut être simulée à l'aide du modèle Simulink ci-dessous :

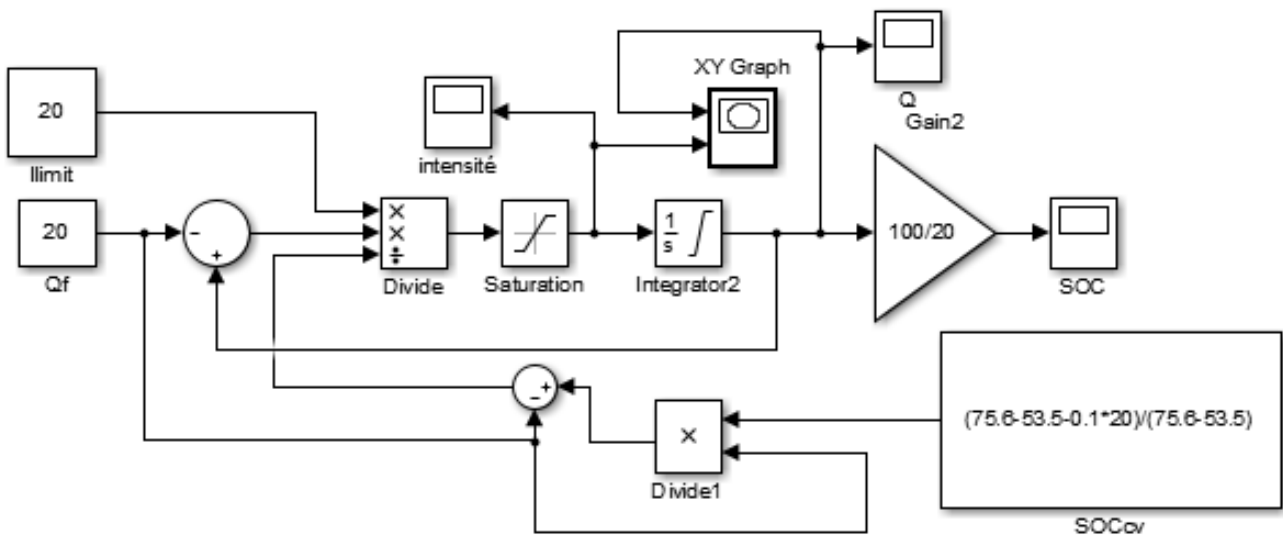


Figure 8 : Schéma de simulation de la charge d'une batterie de 75,6V en fonction du temps avec le mode CV et CC (sous Simulink).

Pour une charge de batterie à 20 A.h avec une résistance équivalente de 0,1 Ω pour laquelle le SoC_{cv} s'établit à 91%, la durée de charge est très faiblement impactée. Les évolutions temporelles du courant et de la capacité énergétique sont représentées sur les 2 figures suivantes pour 2 valeurs de limitations de courant (20A et 40A) à partir d'une capacité énergétique restante de 1A.h.

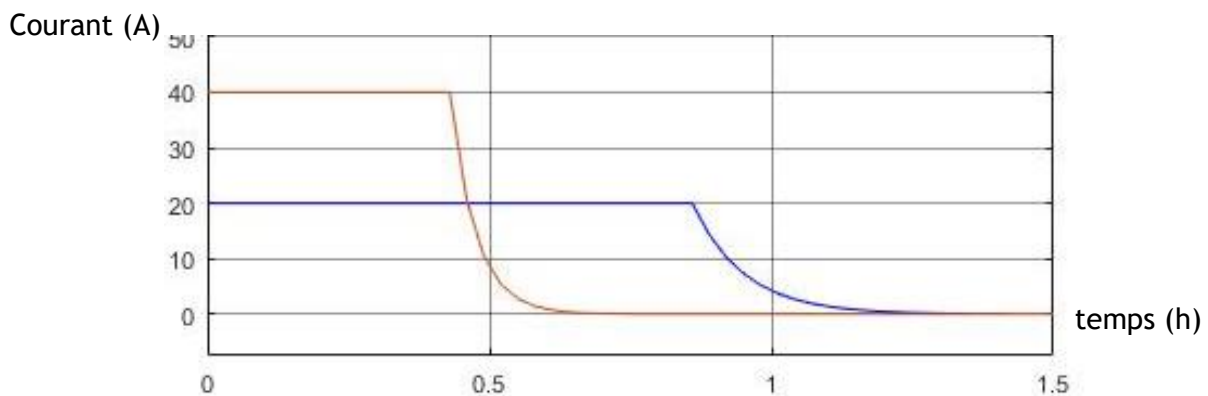


Figure 9 : Évolution du courant de charge en fonction du temps

Pour un courant de charge supérieur à 1C, le « courant limité » va dépendre des caractéristiques thermiques de l'accumulateur (inertie, refroidissement, variation de température). La durée de charge n'est donc plus donnée par les relations (9,10).

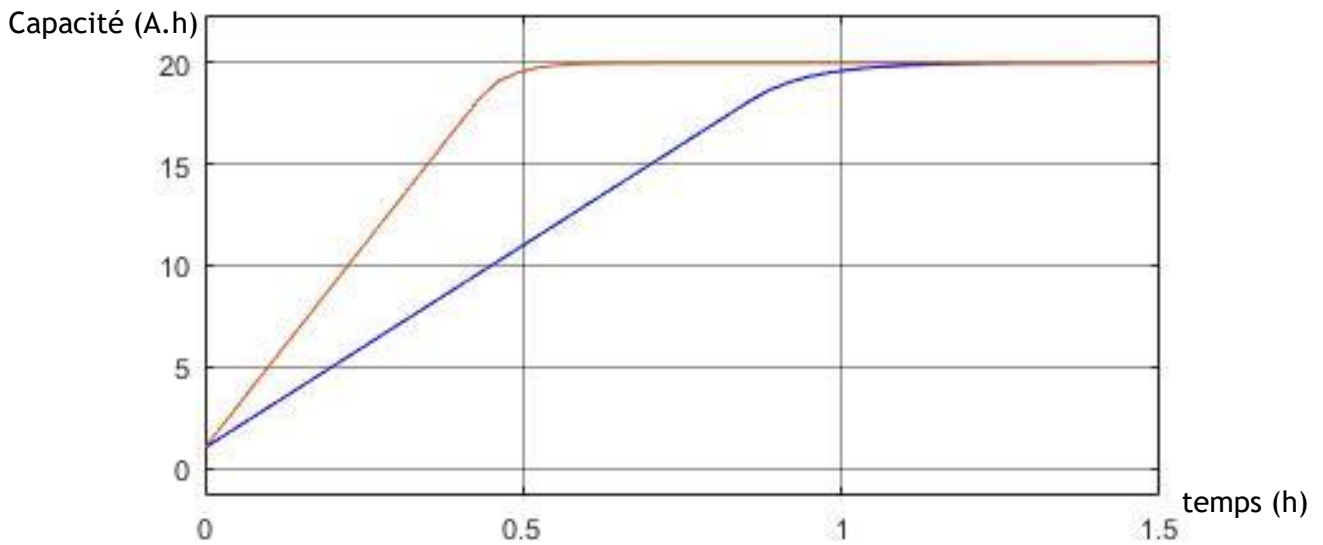


Figure 10 : Capacité énergétique en fonction du temps, résistance interne de 4mΩ.

5 - Paramétrage BMS

La capacité énergétique des batteries diminue fortement si la batterie est stockée avec une charge de 100% et lorsque sa température dépasse 35°C (effet calendaire). En effet, de nombreux essais indiquent qu'il y a une dégradation bien plus importante lorsque la batterie est stockée à 90% de charge par rapport à 60% ou à 30% et surtout pour des températures supérieures à 35°C quelque que soit la chimie. La figure 11 permet de mettre en évidence l'effet calendaire sur l'énergie stockée de la batterie qui diminue avec le temps même si elle n'est pas utilisée [13,14].

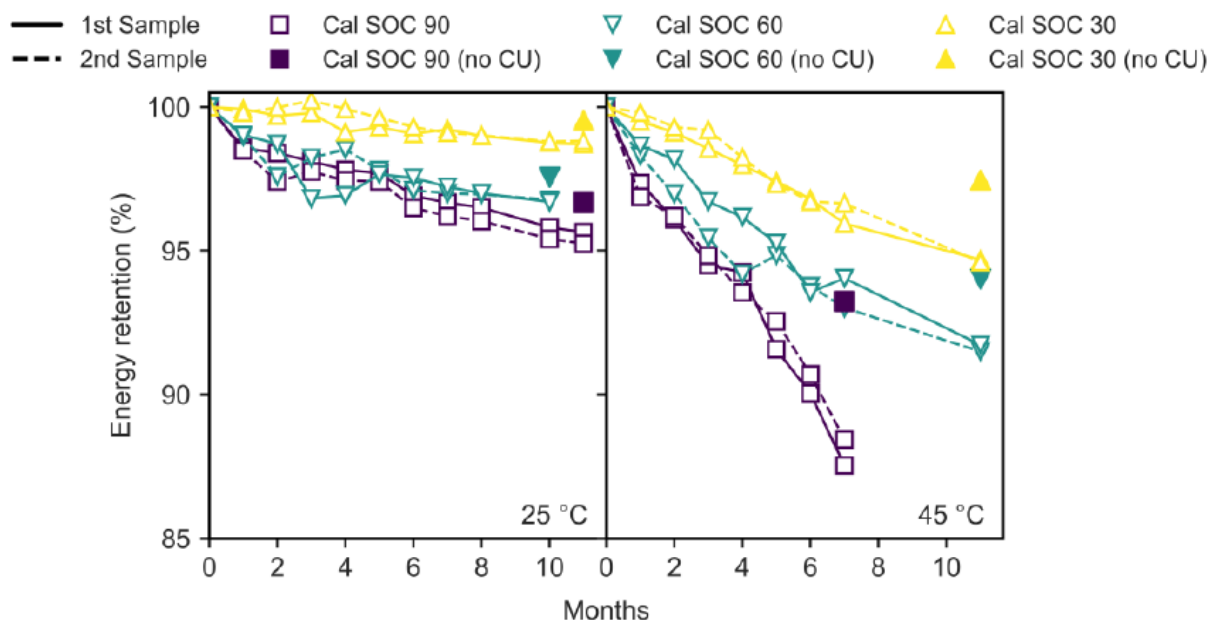


Figure 11 : Énergie de la batterie en fonction du SoC de stockage et de la température [13]

Si la capacité énergétique n'est pas limitante, il est possible de diminuer la tension du chargeur pour obtenir une utilisation de 80% de la capacité maximale avec équilibrage. La tension de seuil des éléments du BMS doivent alors être changée. Seul les BMS numériques permettent éventuellement ce réglage si toutefois une communication chargeur - BMS est réalisée.

A titre d'exemples, les chargeurs de modélisme avec équilibrage interne permettent de recharger à la capacité désirée. De plus, l'équilibrage passif peut se faire avec des courants de 0,5 A grâce à la ventilation forcée et déportée.

6 - Conclusion

Dans cet article, nous avons mis l'accent sur des pistes d'évolution pour les BMS, que ce soit sur les aspects réglages ou communication avec le chargeur.

Par ailleurs la communication par Bluetooth via un smartphone ou un PC permet, tout en évitant un écran sur le chargeur, de réaliser un diagnostic de la batterie (mesure de résistances internes de tous les éléments, prise en compte de la température, ou paramétrage du BMS en fonction d'une utilisation désirée, ...).

Nous avons aussi vu que l'utilisateur peut optimiser la durée de charge, lisser, les pics de puissance et régler la capacité énergétique afin d'augmenter la durée de vie de l'accumulateur.

7 - Bibliographie

- [1] A.Sivert, F.Betin, B.Vacossin, A.Yazidi , H.Caron «Stratégie de choix entre différentes technologies de batteries Lithium (Durée de vie, fiabilité...)» Symposion génie électrique, Juillet 2018,
- [2] A.Sivert, B. Vacossin, F. Betin, « Etude technique comparative de différents véhicules électriques de 50 kg à 1500 kg , Vitesse, consommation, batteries, prix, modes de charge » revue R3EI nov 2021, N° 106
http://actes.sge-conf.fr/2018/articles/article_184697.pdf
- [3] A.Sivert, F.Betin, B.Vacossin , H.Caron, « Etat de Santé de batterie lithium par Régression Linéaire et par Incremental Capacity » SGE 2021 juillet
- [4] «A Novel Electric Bicycle Battery Monitoring System Based on Android Client »
https://www.researchgate.net/publication/318998340_A_Novel_Electric_Bicycle_Battery_Monitoring_System_Based_on_Android_Client
- [5] «Optimized charging of power battery» Advanced Energy Storage and Application
<http://en.aesa.net.cn/About.aspx?ClassID=125>
- [6] Intersil ISL94203 datasheet
<https://manualzz.com/doc/30396782/isl94203-datasheet>
<https://pdf1.alldatasheet.fr/datasheet-pdf/view/1052355/RENESAS/ISL94203.html>
- [7] BQ76PL455A « 16-Cell Li-Ion Battery Active Balance capacitor»
<https://www.ti.com/tool/EM1402EVM>
- [8] Techniques balancing battery
<https://circuitdigest.com/article/cell-balancing-techniques-and-how-to-use-them>
- [9] « Basic principles of automotive modular battery management system design » IOP Conference 2020
https://www.researchgate.net/publication/341765471_Basic_principles_of_automotive_modular_battery_management_system_design
- [10] BMS balancing active
<https://www.dalybms.com/the-optional-description-of-daly-active-equilibrium-bms-2-product/>

[11] BMS open source Arduino

<https://forum.arduino.cc/t/bms-etat-de-charge-et-sante-de-batterie-lithium-banc-cyclage-arduino/607106/50?page=3>

<https://github.com/Eman2000/Arduino-BMS>

[12] Test de PCB d'équilibrage actif distribué

<http://velorizantal.1fr1.net/t26614p275-eclairage-a-del-pour-velo-led-light-for-bike-partie-2>

[13]Thèse, Marc Haber, 2023 «Improving the lifetime prediction methodology of Li-ion batteries for electric vehicles»

[14] Thèse, Eduardo Redondo Iglesias « Étude du vieillissement des batteries lithium-ion dans les applications "véhicule électrique" : combinaison des effets de vieillissement calendaire et de cyclage »