



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 179178 - 682523 - v3.0

07/09/2020

DRA 06 – Opération B3

Rôles des Systèmes de Gestion de Batterie (Battery Management System) dans la sécurité des packs

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET
SOLIDAIRE

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : **Direction des Risques Accidentels**

Rédaction : LESAGE Jerome

Vérification : BORDES ARNAUD; GENTILHOMME OLIVIER; DELBAERE THIERRY

Approbation : SOENEN MARIE-ASTRID - le 07/09/2020

Liste des personnes ayant participé à l'étude : LESAGE Jerome

Table des matières

1	Introduction.....	6
1.1	Contexte et objectifs de l'étude.....	6
1.2	Limitations du périmètre de cette étude.....	7
2	Principales conséquences de la défaillance d'un pack batterie.....	8
2.1	Emballement thermique.....	8
2.2	Continuité de service.....	8
3	Rôle du Battery Management System dans la sécurité d'un pack batterie.....	10
3.1	Architecture fonctionnelle.....	10
3.2	Fonctionnalités d'un Battery Management System.....	11
3.2.1	Mesurer et commander.....	12
3.2.1.1	Mesure de la tension et de la température des éléments.....	12
3.2.1.2	Mesure du courant du pack.....	13
3.2.1.3	Difficultés relatives à ces mesures de tension, de température et de courant.....	14
3.2.1.4	Commande du contacteur.....	14
3.2.1.5	Mesure de l'isolement.....	15
3.2.2	Protéger.....	16
3.2.2.1	Protection contre les surintensités.....	16
3.2.2.2	Protection contre les surcharges / surdécharges des éléments.....	17
3.2.2.3	Protection contre les courts-circuits.....	17
3.2.2.4	Protection contre les températures extrêmes des éléments.....	19
3.2.3	Gérer.....	19
3.2.3.1	Estimation de l'état de charge (SOC) et de la puissance maximale.....	20
3.2.3.2	Equilibrage des éléments.....	21
3.2.4	Diagnostiquer.....	23
3.2.4.1	Détection des événements externes au pack.....	23
3.2.4.2	Détection des défauts internes au pack.....	23
3.2.4.3	Estimation de l'état de santé de la batterie (SOH).....	23
3.2.4.4	Autres états internes estimés.....	24
3.2.5	Dialoguer.....	24
4	Architecture matérielle d'un pack batterie.....	26
4.1	BMS centralisé.....	26
4.2	BMS modulaire.....	26
4.3	BMS distribué.....	28
4.4	Autres exigences sur l'architecture matérielle.....	28
5	Ouverture.....	29
6	Références.....	33
7	Glossaire.....	35
8	Liste des annexes.....	36

Figure 1 : Architecture conventionnelle des packs batterie de capacité importante.....	7
Figure 2 : Architecture fonctionnelle d'un pack batterie.....	10
Figure 3: Illustration de la plage d'utilisation en tension d'un élément Li-Ion NMC [4]	12
Figure 4 : Illustration de la plage d'utilisation en courant d'un pack batterie [4]	13
Figure 5 : Contacteurs gérant la connexion du pack batterie à l'applicatif extérieur [8]	15
Figure 6 : Estimation de l'énergie et de la puissance d'un pack batterie.....	20
Figure 7 : Classification de différentes méthodes d'estimation de l'état de charge [12].....	21
Figure 8 : Classification de différentes méthodes d'estimation de l'état de santé [13].....	24
Figure 9: BMS à architecture centralisée	26
Figure 10 : BMS à architecture modulaire	27
Figure 11: BMS à architecture distribuée [14]	28
Figure 12 : Evolution du nombre de publications scientifiques annuelles contenant les termes "Battery Management System"	29
Figure 13 : Déclinaison de l'IEC 62619 dans différents types d'application [17]	31
Figure 14 : Contribution de différents dispositifs de protection dans l'évitement d'un emballement thermique [18].....	37
Figure 15 : Informations contenues dans le BMS pouvant aider au reconditionnement du pack batterie. Appendix A de l'UL 1974:2018	39
Figure 16 : Accident sur un stockage stationnaire à Flagstaff (Etats-Unis).....	40
Figure 17 : Incendie d'un bus (Chine, 04/2015) dû à la défaillance du BMS pendant la charge.....	40
Figure 18 : Incendie d'une Tesla Model S dans un parking souterrain chinois.	41
Figure 19 : Incendie du padock MotoE sur le circuit de Jerez , Mars 2019.....	42

Résumé

Poussé par la transition énergétique, le stockage d'énergie sous forme électrochimique est aujourd'hui en plein essor. Pour la mobilité électrique comme pour le stockage stationnaire, les éléments à électrolyte organique (Lithium-Ion, Lithium-métal, ...) sont aujourd'hui la technologie répondant le mieux aux besoins de ces applications exigeantes.

Mais de tels packs batterie présentent deux enjeux principaux pour la sécurité :

- Assurer la continuité de service,
- Eviter l'emballement thermique des éléments.

Afin de répondre au mieux à ces enjeux, les packs batterie intègrent un système de gestion, couramment appelé BMS « Battery Management System ». Ce BMS ne fait pas que surveiller le pack, il en est le véritable chef d'orchestre : il prend aussi des décisions concernant l'usage et la gestion optimale du pack batterie. En particulier, en se basant sur les informations remontées par ses capteurs de température, de tension, et de courant, le BMS va estimer les états internes du pack pour connaître son état de charge, son état de santé ou la puissance qu'il est capable de délivrer, tout en restant dans ses conditions d'utilisation sûres.

Le BMS permet donc de tirer les meilleures performances du pack batterie, tout en assurant sa sécurité.

1 Introduction

1.1 Contexte et objectifs de l'étude

Au cœur de la transition énergétique, l'utilisation de batteries est aujourd'hui en pleine expansion, dans de nombreuses applications. D'abord utilisées pour rendre autonomes des équipements de faible consommation (téléphone portable, ordinateur, ...), leur utilisation s'est propagée dans des applications bien plus exigeantes, comme la mobilité électrique (voiture, bus, tramway, drone), ou le stockage stationnaire de sources d'énergie intermittentes (éolien, solaire).

Toutes ces applications nécessitent des batteries performantes, capable de stocker de grande quantité d'énergie, de délivrer des puissances importantes, tout en optimisant leur poids ou leur encombrement.

Dans de nombreuses applications, les éléments à électrolyte organique (Lithium-Ion, Lithium-métal, ...) sont aujourd'hui la technologie mature répondant le mieux à ces exigences, grâce à leur densité énergétique très importante, à leur performance, et à leur durée de vie.

Mais cette famille présente pour principal désavantage de devoir être utilisée dans des conditions électriques, thermiques, et mécaniques maîtrisées. Si les éléments sont sollicités en dehors de leur plage de fonctionnement nominal, un emballement thermique peut se produire. Cet emballement thermique peut ensuite se propager aux autres éléments du pack batterie, et créer un incendie, aux effets thermiques et toxiques, et difficilement maîtrisable.

Afin de limiter le risque ou l'impact d'un emballement thermique, certains éléments possèdent des dispositifs de sécurité intégrés à l'élément lui-même (CID, événement, PTC, fusible, ... [1], [annexe 1]). Pour compléter ce premier niveau de protection, toutes les applications utilisant des pack batteries Lithium-Ion intègrent un système de gestion de batterie, plus couramment désigné par son appellation anglaise « Battery Management System » (BMS).

Ce BMS a pour principal rôle de maintenir le pack batterie dans les conditions électriques et thermiques compatibles avec sa plage d'utilisation sûre. Il est également un contributeur essentiel à la continuité de service de l'application qu'il alimente. Or, dans de nombreuses applications, la continuité de service est essentielle pour la sécurité.

Le présent document a pour but d'investiguer la thématique des BMS d'un point de vue sécurité.

Avant d'entrer dans le cœur du sujet, nous rappellerons les principales conséquences d'une défaillance d'un pack batterie. Ceci nous permettra de comprendre en quoi les fonctionnalités du BMS jouent un rôle dans la sécurité.

Ensuite, les fonctionnalités des BMS seront détaillées, en s'attardant pour chaque fonction sur son rôle dans la sécurité et les éventuelles difficultés pouvant être rencontrées.

Un aperçu des principales architectures matérielles des pack batterie complètera cette description fonctionnelle, et permettra de comprendre comment le BMS s'intègre au sein des packs batterie.

Nous clôturerons ce document par une analyse des actions qu'il serait intéressant de mettre en œuvre pour continuer à investiguer cette thématique importante pour la sécurité.

En annexe, se trouve une synthèse non-exhaustive de différents dispositifs de protection intégrés au sein d'un pack batterie, et la contribution de chacun de ces dispositifs dans l'évitement d'un emballement thermique.

Un retour d'expérience sur les incidents de pack batterie pouvant être liés au BMS illustrera également l'importance de ce système de gestion des packs batteries à la sécurité.

1.2 Limitations du périmètre de cette étude

La présente étude porte uniquement sur les packs batterie de capacité importante (supérieure au kilowatt.heure), maximisant les enjeux sur la sécurité. En voici deux illustrations :

- Le pack batterie d'une voiture électrique récente stocke environ 70 kW.h : il faut interconnecter et gérer jusqu'à plusieurs milliers d'éléments pour atteindre cette capacité. Ces éléments peuvent être de différents formats (18650, pouch, prismatique, ...),
- Un stockage stationnaire peut dépasser des dizaines de megawatt-heure : même en utilisant des éléments ayant une très forte capacité individuelle, il faut près de 10000 éléments pour atteindre cette capacité totale de stockage.

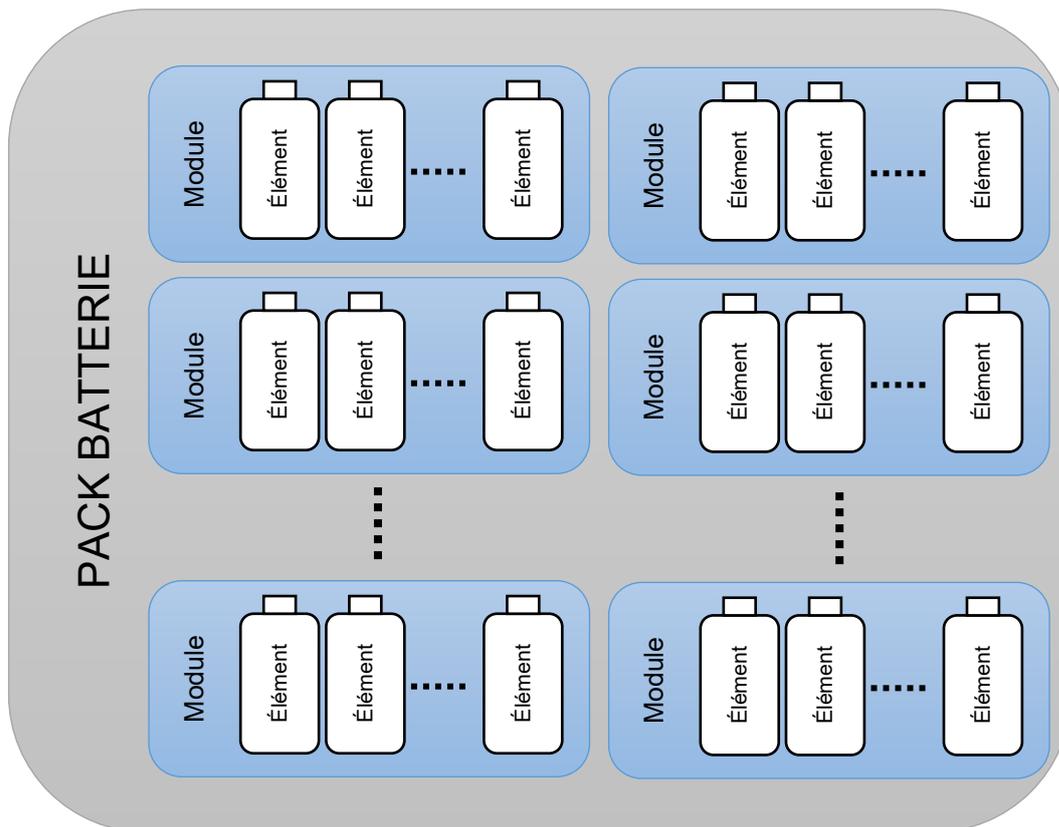


Figure 1 : Architecture conventionnelle des packs batterie de capacité importante

La figure, ci-dessus, présente l'architecture conventionnelle des pack batterie de capacité importante :

- Un pack batterie est constitué de plusieurs modules, connectés en parallèle et/ou en série,
- Chaque module contient lui-même plusieurs éléments, eux-mêmes connectés en parallèle et/ou en série.

Les packs batterie de plus petites dimensions (exemple : petits équipements informatiques et/ou de télécommunications) ne sont composés que de quelques éléments (un seul pour les smartphones, et environ une dizaine pour les ordinateurs portables). L'énergie stockée et la puissance délivrable sont donc relativement faibles. Le BMS assurant leur gestion n'intègre donc qu'une version allégée et simplifiée des fonctionnalités décrites dans ce document.

La gestion thermique des packs batterie (BTMS – Battery Thermal Management System), également très importante pour la sécurité, n'est évoquée que très succinctement. Cette thématique pourrait nécessiter un document dédié.

Les futures technologies d'éléments (Sodium-Ion, Lithium-Soufre, ...), ainsi que les technologies matures utilisées pour les stockages stationnaires (Sodium-soufre), ne sont pas approfondies. Elles peuvent avoir un impact important sur de nombreux paramètres (type de risques à gérer, conséquence de chaque danger, paramètres à mesurer, remise en cause et performance des modèles utilisés, ...).

2 Principales conséquences de la défaillance d'un pack batterie

Avant d'aborder les fonctionnalités d'un BMS, il est important de rappeler les principales conséquences sur la sécurité de la défaillance d'un pack batterie.

Afin d'être aussi synthétique que possible, seules deux conséquences sont mises en avant ici. Ces deux conséquences permettent à elles-seules de comprendre dans la suite du document, l'importance des différentes fonctionnalités du BMS dans la sécurité d'un pack batterie.

2.1 Emballage thermique

L'emballage thermique est l'évènement le plus redouté lors de l'utilisation d'éléments Li-Ion.

Il consiste en une chaîne de réactions chimiques de dégradation des composants internes de l'élément. Ces réactions chimiques génèrent plus de chaleur que ce que l'élément est capable de dissiper : la température de l'élément augmente donc exponentiellement, et de manière non maîtrisée.

Cette violente montée en température s'accompagne d'une montée de la pression interne de l'élément : l'enveloppe de l'élément s'ouvre ou explose, et libère alors des gaz très toxiques (NOx, CO, HF [2]), et inflammables (hydrocarbure léger, H₂, carbonate issu des solvants de l'électrolyte [3]).

L'emballage thermique d'un élément génère une telle montée en température qu'il peut à lui seul provoquer l'emballage thermique des éléments voisins du pack batterie. Cette propagation est le scénario typiquement observé lors des incendies de packs batterie.

Les origines d'un emballage thermique peuvent être multiples. Certains évènements peuvent créer un emballage thermique directement :

- Défaillance interne d'un élément (défaut de fabrication, ou contraintes mécaniques trop importantes amenant à son court-circuit interne),
- Exposition à une température ambiante trop importante,
- Surcharge,
- Court-circuit externe,
- ...

D'autres évènements, s'ils ne sont pas répétitifs, ne sont généralement pas assez importants pour initialiser un emballage thermique seul. Cependant, ces phénomènes ont tendance à dégrader l'élément, et donc à favoriser l'apparition d'un emballage thermique dans la vie de l'élément :

- Circulation d'un courant trop important lors de la charge ou de la décharge,
- Surdécharge,
- Charge à des températures trop basses,
- ...

Le BMS d'un pack batterie doit donc contribuer à éviter toutes ces situations, afin que les éléments soient continuellement utilisés dans leur plage d'utilisation sûre.

2.2 Continuité de service

Le service fourni par un pack batterie à une application est de l'alimenter en électricité, pendant une certaine durée. Le pack batterie doit donc :

- Fournir suffisamment de puissance instantanée à cette application,
- Être capable de délivrer cette puissance dans la durée, en stockant suffisamment d'énergie.

Ces deux grandeurs – puissance disponible et énergie stockée – ne sont pas liées directement entre elles : on peut trouver des packs batteries stockant une grande quantité d'énergie, mais incapable de la restituer rapidement, donc incapable de délivrer une puissance importante. Et réciproquement, certaines batteries peuvent délivrer une puissance très importante, mais pendant une très courte durée, car elle ne stocke que peu d'énergie.

Dans certaines applications (stockage stationnaire alimentant un hôpital, voiture électrique, alimentation secourue d'un avion, ...), la continuité de service est essentielle pour la sécurité.

Les taxis volants électriques, que les industriels annoncent d'ici quelques années, sont un bon exemple pour illustrer l'importance de la continuité de service. Avant de décoller, le pilote du taxi s'enquerra de l'autonomie estimée par le BMS pour savoir s'il peut arriver à destination. Mais :

- Une erreur sur l'énergie stockée dans le pack batterie empêchera le taxi d'arriver jusqu'à sa destination,
- Une erreur sur la puissance délivrable empêchera les moteurs de tourner suffisamment rapidement pour maintenir le taxi dans les airs.

Puissance disponible et énergie restante ne sont pas des grandeurs directement mesurables dans un pack batterie. L'un des rôles du BMS est de les estimer. L'exemple du taxi volant illustre clairement que toute erreur trop importante sur ces estimations peut avoir un impact sur la sécurité.

Note : comme évoqué plus loin, le BMS est capable de détecter une tension faible des éléments, et d'en alerter le pilote du taxi afin qu'il puisse éviter le crash.

3 Rôle du Battery Management System dans la sécurité d'un pack batterie

3.1 Architecture fonctionnelle

Un pack batterie peut se représenter schématiquement de la façon suivante :

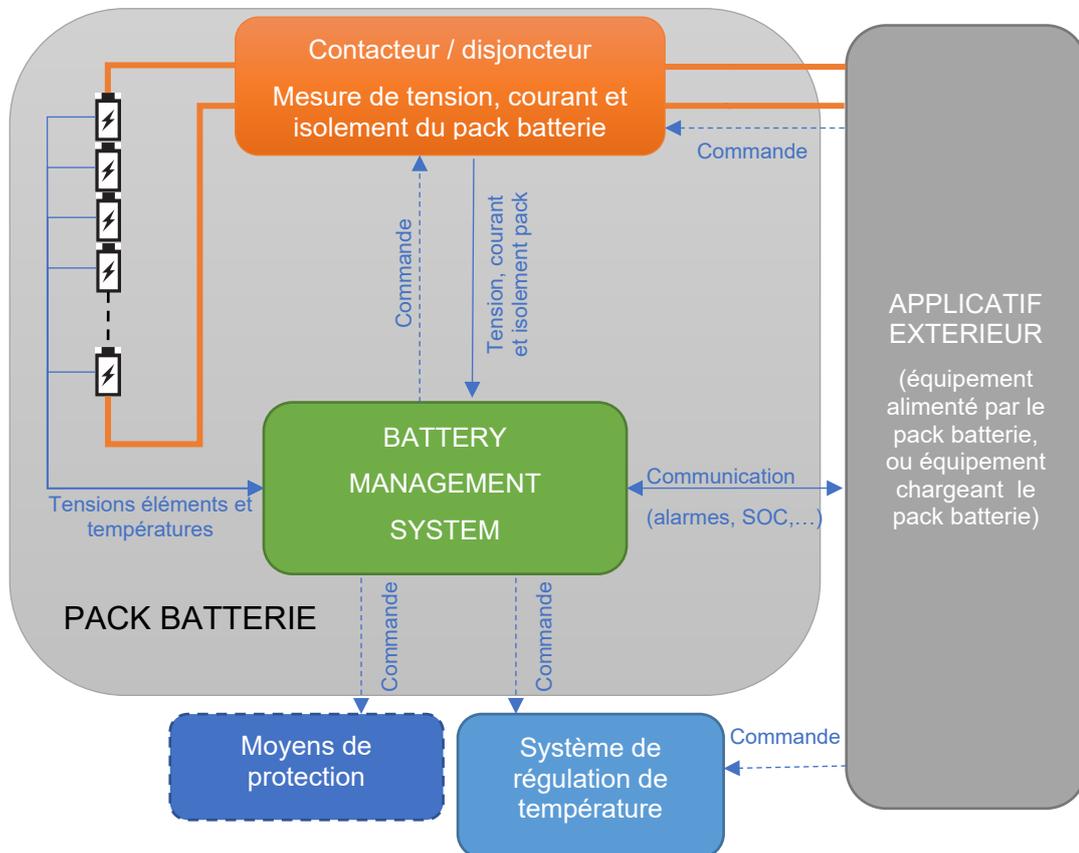


Figure 2 : Architecture fonctionnelle d'un pack batterie

Partie intégrante du pack batterie, le BMS est connecté :

- Aux différents éléments à superviser (mesure de leur tension et température),
- Aux organes contrôlant la connexion de la puissance (contacteur, disjoncteur) et mesurant les caractéristiques électriques de cette partie puissance (courant et isolement),
- A l'applicatif extérieur (équipement alimenté par le pack batterie ou équipement qui sert à charger le pack batterie), pour échanger avec lui toutes les informations requises par l'utilisation (état de charge, alarme, ...),
- Au système de régulation de la température du pack,
- Aux éventuels moyens de protection contre les incendies (rencontré surtout sur les applications de stockage stationnaire).

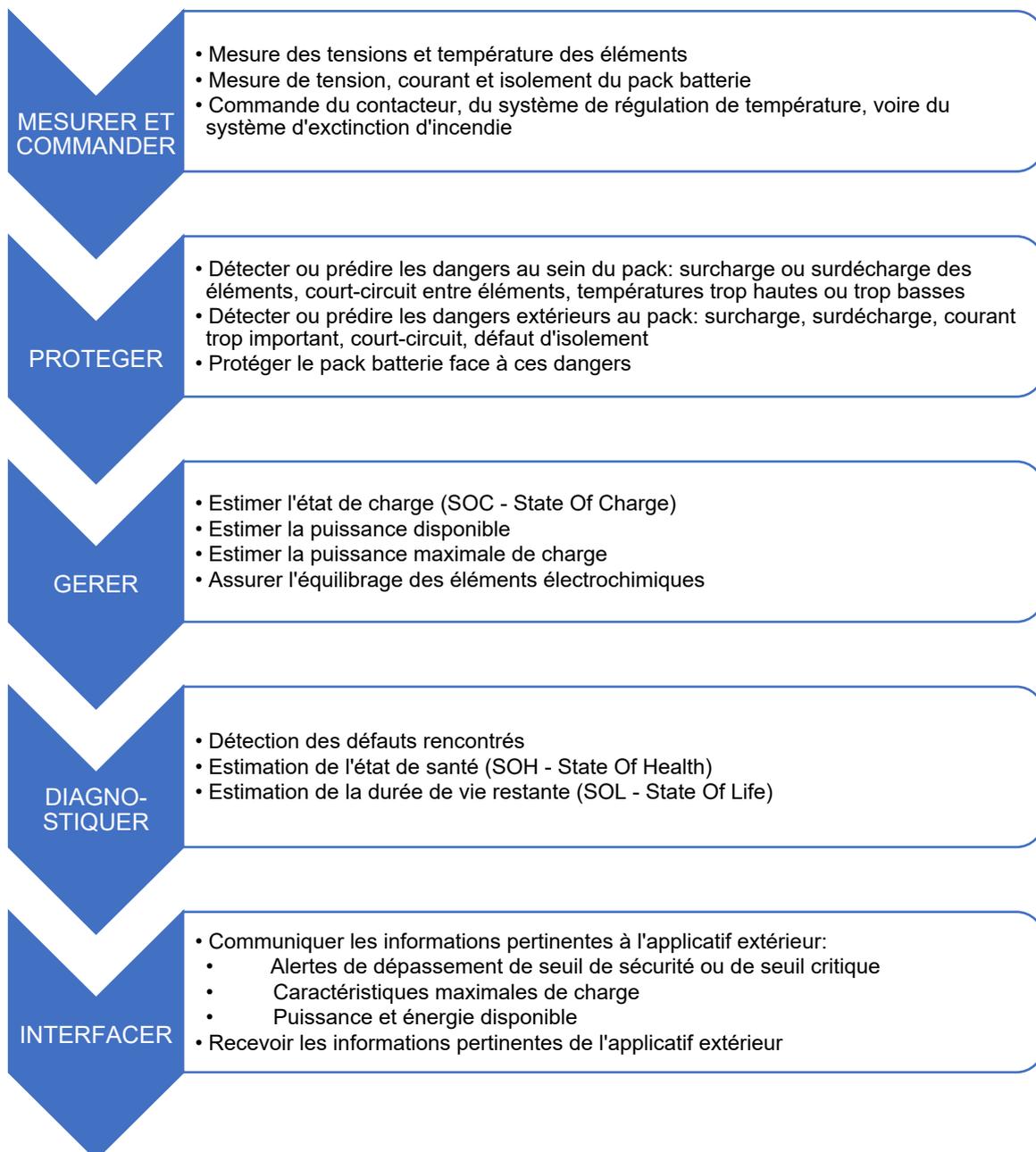
A notre connaissance, l'alimentation du BMS est réalisée par le pack batterie lui-même.

Notes :

- Les contacteurs/disjoncteurs, le système de régulation de température et les éventuels dispositifs d'extinction d'incendie sont parfois commandés par l'applicatif extérieur, sur la base des informations communiquées par le BMS à cet applicatif extérieur.
- Le système de régulation de température du pack batterie est optionnel : il peut être inexistant, être capable de chauffer uniquement le pack, ou de chauffer et refroidir le pack. Dans la suite de ce document, nous appellerons :
 - o « Régulation de température passive » une dissipation de chaleur naturelle, par simple convection, conduction et rayonnement du pack et de ses éventuels radiateurs.
 - o « Régulation de température active » une régulation de chaleur améliorée à l'aide d'un dispositif actif (ventilation forcée d'air, circulation d'un liquide de refroidissement, ...)

3.2 Fonctionnalités d'un Battery Management System

Les fonctionnalités d'un BMS peuvent être réparties en différentes catégories :



Les paragraphes suivants détaillent, pour chaque niveau de ce diagramme, toutes les fonctionnalités ayant un impact sur la sécurité, et identifie pour chacune d'elle les facteurs de risque pouvant amener à une dégradation du niveau de sécurité.

3.2.1 Mesurer et commander

Les fonctions de mesure sont les fonctionnalités primaires du BMS : toutes les autres fonctionnalités s'appuient sur les valeurs de tension, de température et de courant mesurées ici. Ces fonctions doivent donc être suffisamment fiables et précises pour que le BMS puisse remplir son rôle sécuritaire.

3.2.1.1 Mesure de la tension et de la température des éléments

3.2.1.1.1 Mesure de la tension de chaque élément

La tension de chaque élément ne doit en aucun cas être au-delà de la plage de valeur sûre définie par le fabricant.

- Une tension trop élevée, synonyme de surcharge, peut rapidement entraîner un emballement thermique,
- Une tension trop basse sous-entend une surdécharge, qui dégrade l'élément, et donc facilite à terme l'apparition d'un emballement thermique.

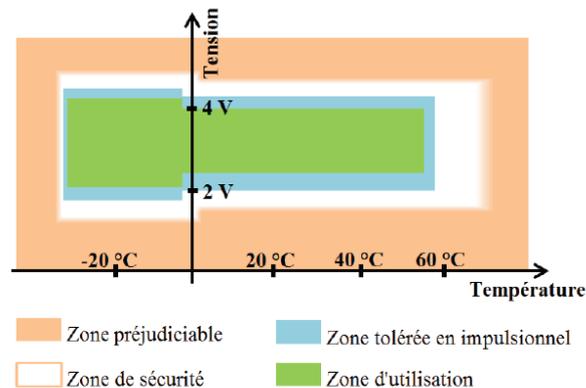


Figure 3: Illustration de la plage d'utilisation en tension d'un élément Li-Ion NMC [4]

La tension doit donc être mesurée par le BMS aux bornes de chaque élément.

Dans le domaine automobile, que ce soit pour une Tesla Model S ou une Smart Fortwo Electric Drive, ceci représente une centaine de tensions différentes à mesurer continuellement [5]. Ces chiffres peuvent encore augmenter avec les packs batteries de plus grande capacité énergétique (bus, tramway, ...).

Par ailleurs, pour des raisons de sécurité, la mesure de tension de chaque élément est très souvent doublée. Moins précise, la fonction redondante a pour but d'alerter si la tension est sous un certain seuil (surdécharge) ou au-dessus d'un autre seuil (surcharge).

3.2.1.1.2 Mesure de la température des éléments

La température des éléments est également importante pour la sécurité du pack batterie :

- Une température excessive peut entraîner directement un emballement thermique,
- L'utilisation des éléments (charge ou décharge) à une température trop basse entraîne leur rapide dégradation, et donc facilite à terme l'apparition d'un emballement thermique.

Idéalement, la température devrait être mesurée sur chaque élément. Mais, les packs batterie possédant souvent plusieurs milliers d'éléments, ceci n'est pas concevable. Dans la pratique, la température est le plus souvent mesurée en quelques points par module. L'analyse de composants électroniques dédiés à la supervision des éléments permet d'établir le ratio suivant : entre 1 et 4 mesures de températures sont réalisées pour six mesures de tensions [5]. Ces sondes doivent être positionnées judicieusement pour détecter au plus vite une température excessive.

Malgré tout, l'absence d'un capteur de température au niveau de chaque élément présente des limites lors d'un emballement thermique : un élément chauffant brutalement à plusieurs centaines de degrés a le temps de transmettre beaucoup de chaleur aux éléments voisins avant que cet échauffement ne soit détecté.

De plus, la présence de plus de capteurs de température permet de mieux connaître la température d'utilisation de chaque élément, ce qui permet l'utilisation des éléments au maximum de leur performance, sans risquer une température excessive qui amènerait à la dégradation plus rapide des éléments, voire à l'emballement thermique.

Note :

Des chercheurs travaillent sur l'implantation de capteurs de températures in-situ (au sein même de l'élément) en utilisant des thermocouples, des thermistances ou de la fibre optique [6]. L'implémentation de ce type de capteur à l'intérieur de la cellule permettrait la détection précoce d'une défaillance.

Ponctuellement, d'autres températures sont parfois mesurées par le BMS, comme la température du contacteur, des fusibles, ou des câbles ou jeux de barre de cuivre utilisés pour faire circuler la puissance entre la batterie et l'applicatif extérieur. Ces mesures sont mises en œuvre lorsque ces éléments sont volontairement sous-dimensionnés, afin d'optimiser le poids total du pack batterie [5].

Lorsqu'un système de régulation actif est mis en œuvre, la mesure de température liée à ce système de régulation peut également être mise en œuvre (exemple : température du liquide de refroidissement).

3.2.1.2 Mesure du courant du pack

Le pack batterie est dimensionné pour fournir (ou recevoir) un courant maximum en fonction de la température environnante. Un courant supérieur à cette limite peut entraîner une surchauffe des éléments (risque d'emballement thermique et vieillissement accéléré), et une surchauffe de la connectique de la partie puissance (risque de court-circuit interne au pack).

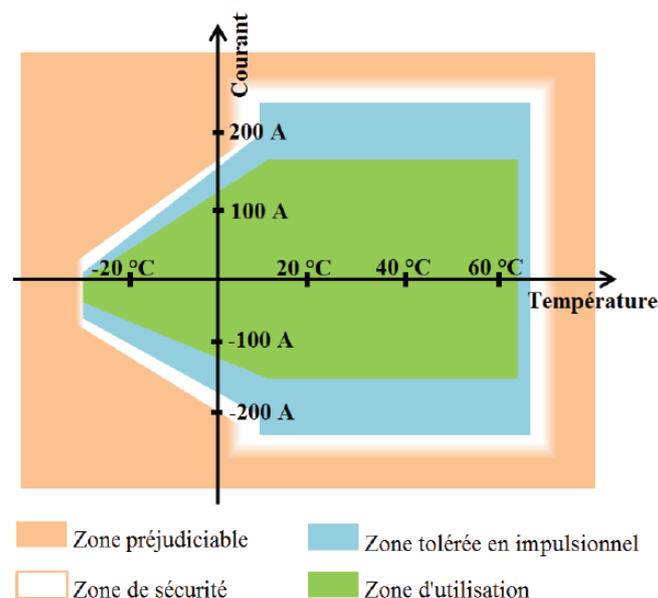


Figure 4 : Illustration de la plage d'utilisation en courant d'un pack batterie [4]

La mesure du courant du pack batterie est donc indispensable.

Deux méthodes principales sont utilisées pour la mesure du courant : [5]

- L'utilisation d'un shunt résistif, en série avec la sortie puissance : la mesure de la tension aux bornes du shunt permet de connaître le courant qui le traverse.
- L'utilisation d'un capteur de champ magnétique (capteur magnéto-résistif, capteur à effet hall, ...) : placer autour d'un conducteur de la sortie puissance, ils permettent de connaître le champ magnétique émis par ce conducteur et donc d'en déterminer le courant y circulant.

Chacune de ces méthodes a ses propres avantages et inconvénients (isolation galvanique, précision, dérive de la mesure face aux variations de température, offset, ...). Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes dépend donc des besoins spécifiques à l'application.

3.2.1.3 Difficultés relatives à ces mesures de tension, de température et de courant

Câblage :

Compte tenu du nombre de mesures à réaliser, le câblage à mettre en œuvre pour réaliser ces mesures de tension et de température est très conséquent.

Un défaut de ce câblage empêche non seulement la lecture d'une information critique pour la sécurité, mais peut de plus provoquer des courts-circuits entre éléments (déconnexion d'un câble qui viendrait en contact avec une autre partie conductrice). De plus, dans le domaine du transport, les câbles sont soumis à de nombreuses vibrations, ce qui favorise les défauts de câblage.

Une attention particulière doit donc être portée sur la qualité de ce câblage.

Précision de mesure :

La précision des mesures est également importante pour les fonctions de plus haut niveau du BMS. Ces fonctionnalités de plus haut niveau participent également à la sécurité de l'application, et ont besoin de se baser sur des valeurs précises pour assurer correctement leur rôle.

Pour exemple, une imprécision de 1 mV sur la mesure de tension d'éléments Li-Ion LFP (LiFePO₄) peut avoir un impact de près de 6 % sur l'estimation de l'état de charge [5]. Or, les circuits intégrés couramment utilisés pour réaliser ces fonctions ont une précision de l'ordre de 1 mV. Si l'on ajoute l'imprécision liée aux perturbations électromagnétiques générées par les fortes variations de courant (moteur d'un véhicule électrique, ...), on comprend pourquoi, il peut être difficile d'obtenir une mesure suffisamment précise.

Perturbations électromagnétiques :

Pour la raison évoquée ci-dessus, les perturbations électromagnétiques peuvent avoir un impact important sur la précision des mesures réalisées pour superviser la batterie (tensions, courant, températures) : le BMS peut être leurré et croire, à tort, que le pack est dans sa plage de fonctionnement de sécurité, ... Des perturbations mêmes minimales auront un impact sur la précision des différents états internes de la batterie (niveau de charge, puissance délivrable, état de santé, ...)

Pour lutter contre ces perturbations électromagnétiques, Mercedes a présenté à la conférence « AUTOMOTIVE BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS FOR EV/HEVS » de Berlin une plateforme de modélisation qu'ils ont spécifiquement développée en interne pour anticiper les effets indésirables des perturbations électromagnétiques [7].

3.2.1.4 Commande du contacteur

Le contacteur est l'élément permettant de connecter ou de déconnecter physiquement la sortie puissance du pack batterie à l'applicatif extérieur ([équipement alimenté par la batterie](#) ou [équipement qui sert à charger la batterie](#)).

La défaillance la plus redoutée pour ce contacteur est de rester en position fermée. Dans ce cas, il n'y a plus possibilité de « débrancher » le pack batterie de l'applicatif extérieur, même en cas d'utilisation du pack batterie au-delà de sa plage de fonctionnement sûre.

Pour renforcer la sécurité, deux contacteurs indépendants sont souvent mis en œuvre : l'un coupe la polarité positive, et l'autre la polarité négative.

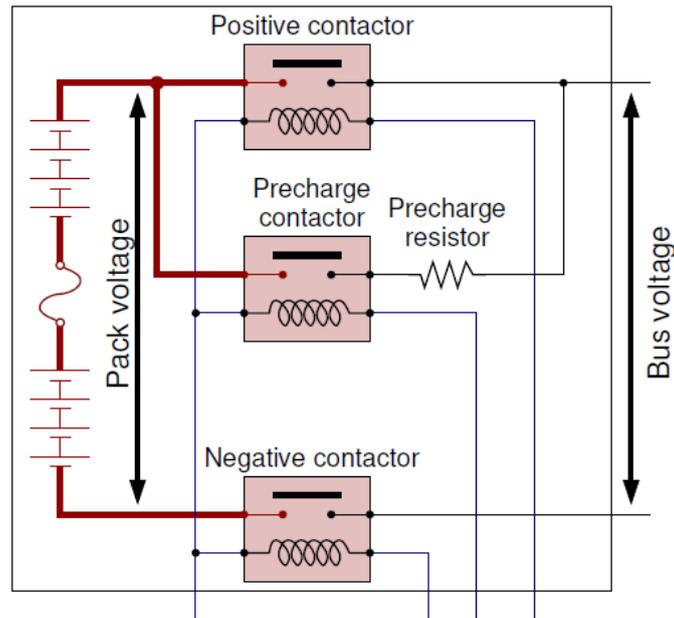


Figure 5 : Contacteurs gérant la connexion du pack batterie à l'applicatif extérieur [8]

Dans certaines applications, des contacteurs différents sont utilisés pour séparer physiquement le pack batterie de l'équipement alimenté par la batterie d'une part, et de l'équipement qui sert à charger la batterie d'autre part.

Pour les applications impliquant de fortes puissances, cette redondance n'est pas suffisante. En effet, lors de la fermeture du contacteur, l'applicatif extérieur peut générer un très fort appel de courant (charge de ses condensateurs). Les contacteurs ne peuvent pas supporter de tels pics de courant : sous l'effet de la chaleur, ils fusionneraient en circuit fermé.

Afin d'éviter ce phénomène, un troisième contacteur est nécessaire. Ce troisième contacteur a pour rôle de relier la batterie à l'applicatif extérieur via une résistance de « précharge ». Cette résistance permet de charger les condensateurs de l'applicatif extérieur avec un courant limité. Une fois ces condensateurs chargés, le contacteur principal peut alors se fermer à son tour en toute sécurité.

3.2.1.5 Mesure de l'isolement

Dans le domaine des véhicules électriques, le circuit de puissance (pack batterie, moteur, ...) est complètement isolé du châssis mécanique du véhicule. Cette mesure a deux origines :

- Un défaut d'isolement entre le circuit puissance et le châssis ne mène pas directement à un court-circuit du pack batterie : il faut cumuler un deuxième défaut d'isolement entre le circuit puissance et le châssis pour que le châssis court-circuite le pack.
- La tension aux bornes du pack batterie est suffisamment élevée pour présenter un risque d'électrisation. Lors de la maintenance du véhicule, l'intervenant ne doit pas risquer de s'électrocuter lorsqu'il prend appui sur le châssis du véhicule pour déconnecter l'une des bornes de la batterie.

La mesure d'isolement permet de détecter si le circuit de puissance est suffisamment bien isolé du châssis du véhicule pour éviter ces risques. Le 1^{er} défaut d'isolement peut être détecté et remonté à l'applicatif extérieur (contrôleur du véhicule électrique). À la suite de ce 1^{er} défaut, l'intervention humaine sur le pack présente un risque d'électrisation, mais la continuité de service est garantie.

Le circuit électronique permettant de mesurer cet isolement est nécessairement simultanément connecté au pack batterie et au châssis : un défaut de ce contrôleur d'isolement peut donc justement entraîner la connexion entre le châssis et le pack batterie. Sa conception devra donc prévenir ce type de défaillance.

3.2.2 Protéger

Une fois les fonctions primaires « mesurer et contrôler » mises en œuvre, la deuxième mission d'un BMS est de protéger les éléments d'une utilisation en dehors de leur plage d'utilisation sûre (électrique et thermique).

Les risques peuvent être internes ou externes au pack batterie :



A chaque risque sont associées plusieurs mesures de protection, détaillées dans les paragraphes ci-dessous.

3.2.2.1 Protection contre les surintensités

Comme vu précédemment, l'intensité maximale circulant dans un élément est défini par son fabricant en fonction de la température de fonctionnement (Figure 4). Le BMS doit donc garantir que le courant circulant dans le pack batterie soit toujours dans sa plage d'utilisation sûre définie par le fabricant, pendant sa charge comme pendant sa décharge.

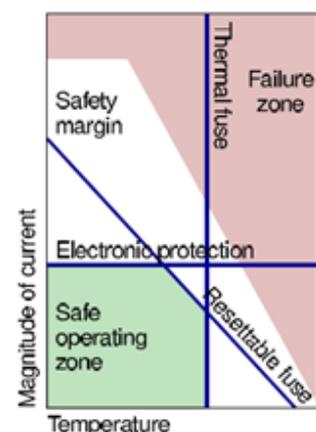
Le BMS peut assurer cette protection contre les surintensités par différents moyens.

- Un premier type de protection est la protection électronique : si la mesure du courant du pack batterie dépasse la valeur acceptable pour la température actuelle, alors le BMS déconnecte le pack batterie de l'applicatif extérieur en ouvrant les contacteurs.
- Un deuxième niveau de protection consiste souvent en l'ajout d'un fusible (ou fusible réarmable, ou disjoncteur thermique) en série entre le pack batterie et l'applicatif extérieur : au-delà d'un courant donné, ces dispositifs s'ouvrent et déconnectent ainsi l'applicatif extérieur du pack batterie.
- Enfin, un fusible thermique peut constituer un troisième niveau de protection. Également placé en série entre le pack batterie et l'applicatif extérieur, il coupe le courant si la température dépasse une valeur critique.

Protections contre les surintensités



Si elles sont bien dimensionnées, la combinaison de ces trois types de protections peut amener une double sécurité contre les surintensités.



Sur l'exemple ci-contre [8], même en cas de défaillance d'une de ces trois protections, le pack batterie ne sera pas sollicité au-delà de ses caractéristiques maximales.

La zone d'utilisation du pack batterie est ici réduite à la zone verte, et la zone blanche est la zone de sécurité permettant la redondance des protections contre les surintensités.

Note sur la protection électronique :

Selon la philosophie choisie, la commande de l'ouverture ou de la fermeture du contacteur peut être gérée :

- Soit par le BMS directement,
- Soit par l'applicatif extérieur, sur la base des informations envoyées par le BMS.

Il semble que les fabricants de véhicules électriques français privilégient la 2nde approche, afin d'assurer la continuité de service : sur autoroute à 130 km/h, le BMS ne peut pas décider seul d'arrêter brusquement le moteur du véhicule.

De leur côté, les fabricants allemands pencheraient plus pour la 1^e approche. Cette approche est également recevable: même sur autoroute, mieux vaut couper le moteur du véhicule plutôt que d'avoir un emballement thermique du pack batterie à 130 km/h.

3.2.2.2 Protection contre les surcharges / surdécharges des éléments

Les tensions minimale et maximale aux bornes de chaque élément sont également définies par leur fabricant en fonction de leur température de fonctionnement (Figure 3). A l'instar des limitations contre les surintensités, le système doit intégrer des dispositifs permettant de limiter les valeurs de tension dans une plage d'utilisation sûre.



La supervision active de la tension de chaque élément par le BMS est un premier niveau de sécurité : le BMS peut ouvrir le contacteur pour déconnecter l'applicatif extérieur dès que la tension d'un élément dépasse un seuil critique haut (surcharge) ou bas (surdécharge).

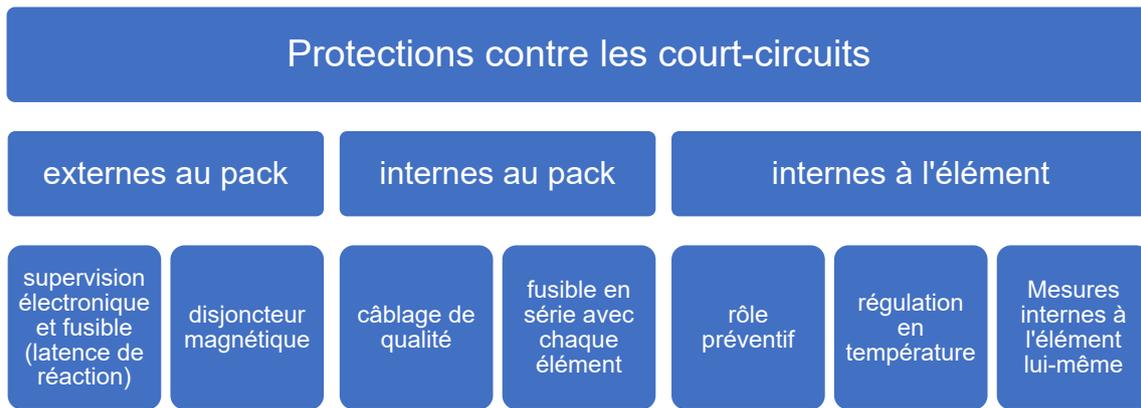
L'applicatif extérieur (**équipement alimenté par la batterie ou équipement qui sert à charger la batterie**) peut également intégrer une surveillance de la tension du pack, et stopper la charge ou la décharge si la valeur est critique.

Enfin, le fusible thermique, déjà proposé pour la protection contre les surintensités, peut également jouer un rôle dans la limitation de la tension des éléments pour les températures élevées.

Voltage	Failure zone	Thermal fuse (charger)
	Electronic prot. (charger)	
	Electronic prot. (battery)	Safety margin
	Safe operating zone	
	Electronic protection	
	Electronic prot. (load)	
	Temperature	

3.2.2.3 Protection contre les courts-circuits

Il faut ici distinguer trois types de court-circuit, selon l'endroit où il se produit : à l'extérieur du pack batterie, entre éléments à l'intérieur du pack batterie, et au sein même d'un élément.



Court-circuit extérieur au pack batterie

Avec une puissance instantanée potentiellement importante, la protection contre les courts-circuits doit agir extrêmement rapidement pour limiter l'énergie transmise dans le court-circuit.

Les protections contre les surintensités (supervision électronique, fusible) agissent également contre les courts-circuits externes au pack.

Cependant, certains packs batterie sont capables de délivrer une puissance instantanée considérable. Dans ce cas, ces protections contre les surintensités peuvent présenter un délai de réaction trop important pour être efficace.

- Généralement, le BMS mesure le courant du pack entre 10 et 100 fois par seconde [9]. Ajouté au délai d'ouverture du contacteur, le temps de réponse de cette sécurité n'est pas optimal.
- Un fusible a également un temps de réponse relativement long. Il ne constitue donc pas une protection optimale contre les courts-circuits.

Pour améliorer la réactivité, certains stockages stationnaires ajoutent un disjoncteur magnétique, capable de déconnecter l'applicatif extérieur du pack batterie très rapidement. Placé juste à la sortie du pack batterie, il a la capacité de le déconnecter rapidement du reste du circuit électrique si un court-circuit externe est détecté, que ce soit pendant la charge ou pendant la décharge. Ces disjoncteurs magnétiques sont calibrés pour s'ouvrir à des pics de courant instantané bien plus élevés que le courant maximal permanent autorisé : ceci évite leur déclenchement abusif en cas de brefs appels de courant de l'applicatif extérieur.

Court-circuit entre éléments au sein du pack batterie

Les différentes protections évoquées jusqu'ici agissent uniquement sur la sortie du pack batterie : elles n'ont donc aucun effet contre les courts-circuits internes au pack.

Les moyens d'éviter ce risque sont principalement une conception mécanique adaptée (espacement et isolement entre les conducteurs, fixation et serrage des connectiques, ...).

Parfois, des fusibles sont placés en série avec chaque élément. C'est par exemple le cas du pack batterie de la Tesla Model S [5]. Ces fusibles apportent une protection des courts-circuits interne au pack.

Des organes de sécurité intégrés aux éléments eux-mêmes (exemple : CID – Current interrupting device-, ou PTC – Positive Temperature Coefficient-, voir §7,) peuvent également contribuer à la prévention des risques liés aux courts-circuits entre éléments au sein du module.

D'autre part, les BMS à architecture distribuée (voir §4.3) intègrent de l'intelligence au sein de chaque élément : de tels BMS peuvent également agir contre les courts-circuits entre éléments à l'intérieur du pack batterie.

Court-circuit interne à l'élément

Les BMS n'ont à notre connaissance aucun moyen d'action directe contre les courts-circuits internes aux éléments. Ils peuvent toutefois lutter contre la propagation de l'emballement thermique en détectant la montée en température, ce qui lui permet de couper le courant consommé (arrêt de l'échauffement fonctionnel) et d'activer le dispositif de refroidissement.

Le BMS joue également un rôle préventif majeur contre ces courts-circuits internes, grâce à toutes ses fonctionnalités permettant aux éléments de travailler dans leur plage d'utilisation sûre.

Note : L'impact des courts-circuits interne à l'élément peut être limité en intégrant des mesures de sécurité à l'intérieur même des éléments (séparateur devenant étanche aux ions à hautes températures, électrolyte devenant plus résistive à haute température [10]).

3.2.2.4 Protection contre les températures extrêmes des éléments

Protections contre les températures extrêmes des éléments

Régulation en température

Adapter le profil d'utilisation

fusible thermique

Le premier niveau d'action du BMS pour prévenir l'exposition des éléments à des températures en dehors de la plage d'utilisation sûre est d'agir sur le système de régulation de température (chauffage ou climatisation).

Un deuxième niveau d'action est de proposer à l'applicatif extérieur des puissances plus faibles, adaptées à la température du pack batterie. Il faut alors que l'applicatif extérieur réduise effectivement la puissance consommée ou envoyée pour que cette mesure soit utile.

Le fusible thermique, évoqué précédemment pour éviter une surintensité, surcharge ou surdécharge des éléments à haute température, intervient également en tant que dispositif de protection contre les températures élevées.

Note sur le vieillissement des éléments :

La température de fonctionnement ou de stockage d'un élément a un impact important sur son vieillissement. Or, la température au sein d'un module n'étant pas uniforme, le vieillissement des éléments au sein d'un module ne l'est pas non plus.

Lorsqu'un élément vieillit, sa résistance interne augmente : pour un courant donné le traversant, il s'échauffe alors plus que les autres éléments.

Ainsi, un élément plus chaud que les autres vieillit plus vite, ce qui le fait chauffer encore plus, ce qui aggrave l'hétérogénéité de température au sein du pack, et par conséquent, accélère encore plus son vieillissement ... Cette boucle de vieillissement accéléré peut à terme favoriser l'emballement thermique d'un élément qui aurait vieilli bien plus vite que les autres.

De nombreux travaux en cours sur les BTMS (Battery Thermal Management System) visent notamment à réduire les différences de température au sein des modules, afin d'en optimiser leur performance et leur sécurité [11].

Ce vieillissement hétérogène a également un impact sur la seconde vie des packs batterie, car ces éléments isolés vont limiter la performance de l'ensemble du pack. Disposer d'informations élément par élément (architecture distribuée, voir §4.3) permettrait de diagnostiquer finement l'état de chaque élément : le remplacement des quelques éléments les moins performants pourraient augmenter significativement les performances globales du pack dans sa seconde vie.

3.2.3 Gérer

Les applications mettant en œuvre de fortes puissances ou stockant de grandes quantités d'énergie sont des applications exigeantes en termes de performance : elle nécessite de pouvoir utiliser les packs batteries au plus proche de leurs caractéristiques maximales, afin de :

- Délivrer le maximum de puissance instantanée,
- Réduire le temps de charge au maximum (puissance de charge maximisée),
- Stocker un maximum d'énergie et être capable de la restituer quasi-intégralement.

Puissance délivrable et quantité d'énergie restante sont les deux grandeurs les plus importantes pour assurer la continuité de service, qui peuvent potentiellement être critique pour la sécurité de l'application (§2.2). De plus, une trop grande puissance ou une surdécharge peuvent dégrader la batterie, favorisant l'apparition d'un emballement thermique.

Aussi, pour que l'applicatif extérieur puisse utiliser le pack batterie de manière optimale en toute sécurité, il est donc capital d'estimer quantité d'énergie restante, puissance délivrable et puissance maximale de charge de façon fiable et suffisamment précise.

3.2.3.1 Estimation de l'état de charge (SOC) et de la puissance maximale

L'état de charge et la puissance maximale sont deux grandeurs capitales pour la sécurité du pack batterie afin d'éviter sa dégradation et d'assurer la continuité de service.

Mais ces deux grandeurs ne sont pas mesurables directement : elles doivent être calculées à partir des caractéristiques individuelles de chaque élément (état de charge individuel, et capacité maximale individuelle, résistance interne de chaque élément).

Malheureusement, ces caractéristiques attendues au niveau de chaque élément ne sont pas non plus directement mesurables. Il faut donc les estimer à partir des seules informations connues par le BMS : tension de chaque élément, températures des modules, et courant du pack batterie.

La figure ci-dessous [8] illustre les étapes entre les grandeurs mesurées (tensions, courant, températures), et les grandeurs estimées (énergie et puissance disponible/recevable)

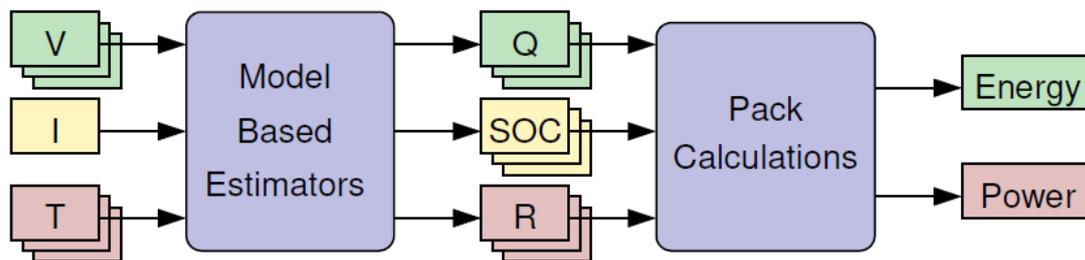


Figure 6 : Estimation de l'énergie et de la puissance d'un pack batterie

La complexité des phénomènes physico-chimiques internes aux éléments rend les estimations de l'état de charge et de la puissance maximale difficiles à réaliser avec précision.

Un grand nombre de méthodes sont décrites dans la littérature scientifique [12]. Chacune de ces méthodes présentent leurs avantages et leurs inconvénients.

Certaines méthodes dites « conventionnelles » sont basées sur la corrélation directe entre les mesures (tensions, courant, températures) et l'état de charge. Par exemple, la méthode « Coulombic Counting » soustrait la somme des courants entrants et sortants du pack pour estimer son état de charge. Ces méthodes conventionnelles, simples et peu coûteuses, peuvent également être peu précises. Ces imprécisions peuvent avoir des impacts sur la sécurité des éléments (surcharge, surdécharge ou surchauffe) et de l'application (moins d'autonomie que prévue).

D'autres méthodes utilisent la modélisation du pack batterie (et en particulier l'« Equivalent Circuit Model ») pour en déterminer ses états internes, et donc son état de charge. Ces méthodes sont dites auto-adaptatives car elles prédisent l'état à venir de la batterie, puis elle le calcule. L'erreur entre l'état prédit et l'état calculé est alors utilisé pour affiner les paramètres du modèle, afin de minimiser l'erreur sur les prochains résultats. Ce type de modèles demande un peu plus de ressources de calcul, sont plus difficiles à mettre à point, mais le résultat obtenu est a priori plus précis.

Les observateurs non-linéaires se basent également sur la modélisation du pack batterie. Ils visent à optimiser la précision de l'état de charge calculé en prenant en considération la non-linéarité des éléments lithium-ion dans leur modèle. Ils demandent donc encore plus de ressources de calcul.

Une troisième grande famille de méthodes est basée sur les algorithmes d'apprentissage (réseaux neuronaux, logique floue). Ces méthodes requièrent une grande quantité de données (et une grande puissance de calcul) pour « apprendre » le comportement non-linéaire du pack batterie à modéliser. L'internet des objets, permettant de connecter un pack batterie au cloud, pourrait permettre d'obtenir un modèle de ce pack à partir des données brutes issues de tous les packs similaires en utilisation. Ceci pourrait potentiellement jouer en faveur du développement de ces méthodes d'apprentissage.

Enfin, d'autres méthodes dites hybrides se basent sur plusieurs types de méthodes abordées ci-avant pour tirer profit de leurs avantages cumulés et ainsi améliorer leur précision.

Voici un aperçu de différentes méthodes existantes (non exhaustif) :

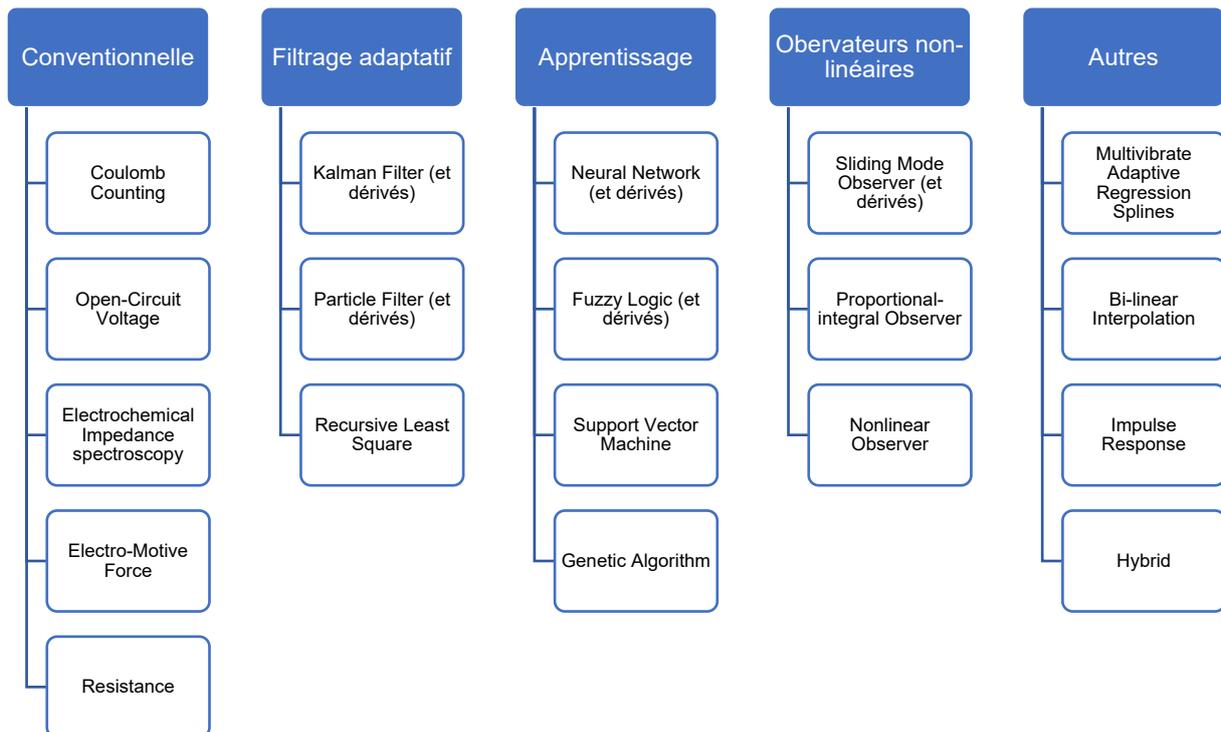


Figure 7 : Classification de différentes méthodes d'estimation de l'état de charge [12]

Ces différentes méthodes sont très difficiles à comparer, car leur performance dépend de nombreux facteurs, comme le profil d'utilisation du pack batterie, la température extérieure, l'adaptation face au vieillissement des éléments, leur robustesse face aux imprécisions de mesures de courant/tensions/températures, ...

La présente étude ne peut rentrer dans le détail de ces différentes méthodologies. Cependant, l'importance de l'estimation de l'état de charge sur la sécurité mériterait une investigation plus approfondie de ces méthodes, et des moyens d'estimer leur performance.

Selon les connaissances de l'INERIS, la méthode auto-adaptative basée sur l'utilisation d'un filtre de Kalman, constitue aujourd'hui l'état de l'art des algorithmes implémentés dans les BMS des véhicules électriques.

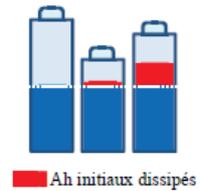
3.2.3.2 Equilibrage des éléments

Afin d'optimiser la quantité d'énergie stockée dans le pack batterie, chaque élément doit être chargé à son maximum. Or, par construction et/ou à cause du vieillissement différent de chaque élément, la capacité et la résistance interne de chaque élément diffèrent.

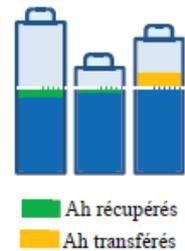
Lors d'une charge globale du pack batterie, si la charge était stoppée dès qu'un élément est complètement chargé alors tous les autres éléments ne seraient que partiellement chargés, une partie de la capacité de stockage du pack batterie ne serait alors pas utilisée.

Pour remédier à ce problème, le BMS procède en fin de charge à un équilibrage des éléments. Plusieurs méthodes sont utilisées :

- Equilibrage dissipatif : les éléments déjà complètement chargés dissipent dans des résistances l'énergie excédentaire stockée. La charge globale reprend ensuite, suivi d'un nouvel équilibrage, jusqu'à ce que le niveau de charge de chaque élément soit considéré suffisant. Ce type d'équilibrage gaspille une partie de l'énergie acquise pendant la charge. C'est néanmoins le plus facile à mettre en œuvre et le moins coûteux, il est donc très couramment utilisé (seule méthode utilisée à notre connaissance dans le domaine automobile) [7]



- Equilibrage non dissipatif : l'énergie excédentaire d'un élément déjà chargé est transmise aux éléments les moins chargés. La charge globale reprend ensuite, suivi d'un nouvel équilibrage, jusqu'à ce que le niveau de charge de chaque élément soit considéré suffisant. Cette méthode est plus optimisée : toute l'énergie envoyée pendant la charge est effectivement stockée. Mais elle nécessite des montages électroniques supplémentaires, donc un surcoût du BMS.



- Equilibrage direct, individualisé : dans une architecture BMS distribuée (cf. §4.3), l'« intelligence » embarquée au sein de chaque élément permet de contrôler la charge de chaque élément individuellement. Chaque élément est donc directement chargé à sa capacité maximale, sans besoin de recourir à des étapes d'équilibrage supplémentaire a posteriori.

L'équilibrage est une étape importante dans la gestion de la batterie. En fin d'équilibrage, chaque élément est considéré complètement chargé : ceci permet de déterminer l'origine « 100 % » de l'état de charge.

3.2.4 Diagnostiquer

Le BMS dispose de différentes fonctionnalités aidant au diagnostic du pack batterie. Ce diagnostic est utile pour aider à la maintenance préventive ou curative d'un pack batterie, et pour contribuer au reconditionnement du pack batterie (seconde vie). Lors de la conférence « AUTOMOTIVE BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS FOR EV/HEVS » de Berlin [7], certains constructeurs automobiles ont d'ailleurs mis en avant l'intérêt:

- D'intégrer des fonctionnalités dans le « BMS première vie » pour prédire les performances et la durée de vie restante du pack en seconde vie,
- De faire évoluer le logiciel du BMS avant la seconde vie pour que celui-ci soit optimisé pour la gestion d'éléments hétérogènes.

Note : La norme UL 1974 liste dans son appendice A toutes les informations couramment connues par le BMS, et qui peuvent être stockées dans sa mémoire interne pour aider au reconditionnement du pack batterie pour une utilisation seconde vie. Ces informations sont reprises en annexe de ce rapport.

3.2.4.1 Détection des évènements externes au pack

Les conditions d'utilisation en courant, tension, puissance, température et cyclage d'un pack batterie ont un impact majeur sur son vieillissement. Le BMS peut analyser et stocker dans sa mémoire interne des données pertinentes relatives à ces conditions d'utilisation.

A minima, toutes les utilisations du pack batterie au-delà de sa plage d'utilisation sûre doivent être détectées et, le cas échéant, enregistrées.

3.2.4.2 Détection des défauts internes au pack

Les défauts de fonctionnement internes du pack peuvent également être détectés et enregistrés. Ces défauts peuvent concerner les différents organes du pack batterie. On peut citer :

- Défaillance ponctuelle ou permanente d'une sonde de mesure de tension, température, courant
- Défaillance du système d'équilibrage des éléments
- Défaillance d'un ou de plusieurs contacteurs
- Défaillance du système de régulation de température
- Défaillance de la communication entre le BMS esclave et le BMS maître, ou entre le BMS maître et l'appliquatif extérieur

3.2.4.3 Estimation de l'état de santé de la batterie (SOH)

L'état de santé de la batterie est un indicateur donnant une information sur son vieillissement, mais sa définition précise diffère en fonction des sources.

Généralement, il représente la capacité maximale actuelle du pack batterie par rapport à sa capacité initiale, à la sortie d'usine. Il s'exprime en pourcentage. C'est donc un indicateur de la dégradation du pack batterie en termes de stockage d'énergie.

La résistance interne du pack batterie est également souvent prise en considération, soit directement dans le calcul de l'état de santé (SOH), soit en tant qu'indicateur séparé. Il s'agit alors d'un indicateur de la dégradation du pack batterie en tant que source de puissance.

Généralement, dans le domaine automobile, on estime qu'un pack batterie est en fin de vie quand on constate que :

- sa capacité a diminué de 20 à 30 %, ou
- sa résistance interne a augmenté de 50 à 100 %

Note : ces chiffres mettent en avant l'intérêt de la seconde vie des pack batterie. Avec de tels critères, les performances du pack batterie sont encore suffisantes pour de nombreuses applications moins exigeantes.

Tout comme pour l'état de charge, l'état de santé d'un pack batterie n'est pas mesurable directement, mais doit être estimé à partir des mesures de tension, courant et température disponibles. Les méthodes utilisées pour estimer l'état de charge sont une fois encore très diverses.

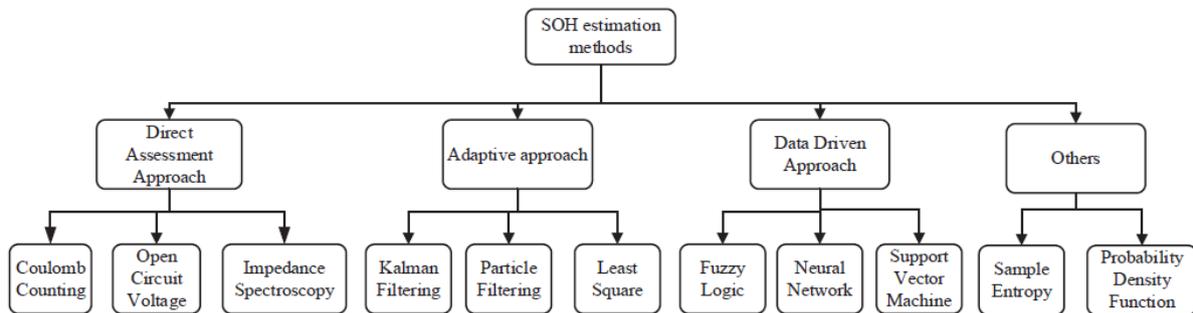


Figure 8 : Classification de différentes méthodes d'estimation de l'état de santé [13]

La présente étude n'entrera pas dans les détails de ces méthodes. Mais l'importance de maîtriser la puissance et l'énergie disponible pour la sécurité du pack batterie mériterait une investigation plus approfondie de ce sujet.

3.2.4.4 Autres états internes estimés

Au-delà de l'état de charge (SOC) et de l'état de santé (SOH), la littérature scientifique utilise d'autres états du pack batterie, plus ou moins bien défini, pour aider au diagnostic du pack batterie.

On peut citer l'état de vie (State Of Life – SOL [8]), également appelé RUL (Remaining Usefull Life [13]) qui consiste à estimer la durée restante avant que la batterie n'atteigne les critères de fin de vie (ou tout du moins de fin de première vie).

L'état de fonctionnement (State Of Function – SOF) est parfois défini pour estimer le niveau de disponibilité du pack batterie. Cet indicateur est défini sur mesure par rapport au besoin spécifique de l'application. Par exemple, pour une application mettant en œuvre des pics de puissance très importants (exemple : véhicule électrique hybride), le BMS pourra calculer pour différentes durées d'impulsion la puissance maximale que peut supporter le pack batterie, et communiquer ces informations à l'applicatif extérieur [4]. Cet indicateur de très haut niveau synthétise finalement toutes les informations connues ou estimées du pack batterie pour donner à l'applicatif extérieur l'information la plus adaptée possible.

3.2.5 Dialoguer

Le BMS a pour rôle de fournir à l'applicatif extérieur toutes les informations nécessaires pour utiliser le pack batterie dans les meilleures conditions.

Protocole de communication

Pour la communication entre le BMS et l'applicatif extérieur, un protocole de communication robuste doit être utilisé afin d'éviter toute défaillance dans la transmission de données critiques pour la sécurité.

Le protocole le plus couramment utilisé dans les véhicules électriques est le CAN (Controller Area Network). Ce protocole est relativement robuste face aux perturbations électromagnétiques. Il est d'ailleurs déjà utilisé depuis de nombreuses années au sein des véhicules pour la communication entre les différents microcontrôleurs.

Certains circuits intégrés dédiés à la gestion des packs batterie proposent des interfaces LIN (Local Interconnect Network), car elles sont moins chères à implémenter. Mais ce protocole est plus facilement perturbé par les perturbations électromagnétiques, courantes dans un véhicule électrique [5].

D'autres BMS utilisent des communications sans fil pour diminuer le coût et le poids du système (pas de câble) [7]. Il existe d'ailleurs des composants électroniques spécialisés dans la transmission Radiofréquence des informations des BMS. Cette solution ne semble pas rencontrer un fort intérêt de la part des industriels du secteur, par crainte des perturbations électromagnétiques qui pourraient dégrader cette communication importante pour la sécurité. D'autres intégrateurs utilisent la transmission infrarouge pour communiquer entre les modules au sein d'un pack [7].

Informations échangées

Le BMS communique à l'applicatif extérieur les conditions sûres d'utilisation du pack batterie qu'il a préalablement calculées (état de charge, puissance maximale disponible, puissance de charge acceptée, ...)

Le BMS a également pour rôle d'alerter l'applicatif extérieur en cas de fonctionnement en dehors de cette plage sûre d'utilisation. Ces alertes comportent le plus souvent deux seuils :

- Niveau avertissement : le BMS prévient qu'une des conditions d'utilisation approche de sa limite de fonctionnement sûre. Ceci permet à l'applicatif extérieur d'adapter son fonctionnement en conséquence avant de risquer un arrêt d'urgence.
- Niveau alerte : le BMS informe l'applicatif extérieur qu'une des conditions d'utilisation est en dehors de la plage d'utilisation sûre. S'il en a le pouvoir, le BMS peut alors déconnecter le pack batterie de l'applicatif extérieur afin d'éviter la détérioration du pack batterie et de risquer l'emballement thermique.

Dans le cas d'un véhicule électrique, le dépassement des valeurs d'avertissement est remonté par le BMS au calculateur central qui a en charge d'effectuer les actions adéquates. La notice d'utilisation de la Renault Zoé donne un exemple concret :

- Lorsque la température du pack batterie dépasse le niveau d'avertissement, un voyant s'allume sur le tableau de bord pour informer le conducteur que celui-ci doit adopter une conduite plus souple.
 Le manuel précise également que si ce témoin est allumé, une perte de puissance peut être ressentie : le calculateur central limite donc les appels de courant du pack batterie pour en éviter la surchauffe.
- Lorsque le niveau de charge du pack batterie est inférieur au niveau d'alerte, le conducteur est prévenu par un signal sonore et par un témoin clignotant. Cette alerte est appelée « seuil d'immobilisation imminente »


Dans le cadre de la maintenance préventive ou curative, ou pour aider au reconditionnement en vue d'une seconde vie du pack batterie, le BMS doit également pouvoir renvoyer l'ensemble des informations et évènement qu'il a stocké dans sa mémoire interne (voir §3.2.4).

D'après les informations que nous avons eues par les fabricants automobiles lors de la conférence «AUTOMOTIVE BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS FOR EV/HEVS » de Berlin [7], il est d'usage que les informations enregistrées par le BMS soient collectées par le fabricant à chaque entretien du véhicule.

4 Architecture matérielle d'un pack batterie

Les fonctions détaillées plus haut dans ce document sont réparties dans une ou plusieurs cartes électroniques. Le présent paragraphe a pour but de détailler les architectures matérielles les plus courantes pour la répartition de ces fonctions au sein du pack batterie.

4.1 BMS centralisé

Dans cette configuration centralisée, une seule carte électronique réalise la totalité des fonctionnalités du BMS [14].

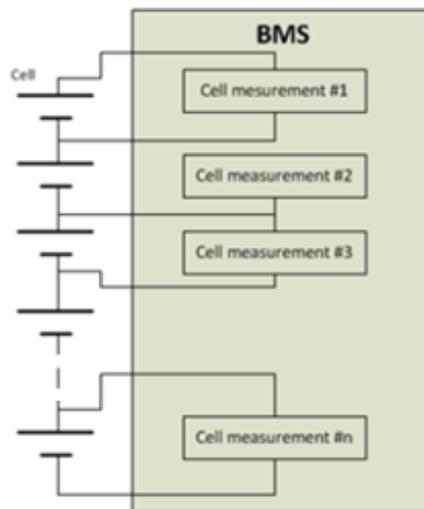


Figure 9: BMS à architecture centralisée

Cette configuration est la plus optimisée en coût, mais les câblages deviennent vite complexes (un pack batterie de voiture peut contenir plusieurs milliers d'éléments). Elle est donc plus appropriée pour les petits pack batterie.

4.2 BMS modulaire

Cette configuration modulaire présente la particularité de déporter au sein de plusieurs cartes électroniques une partie des fonctionnalités du BMS [14] :

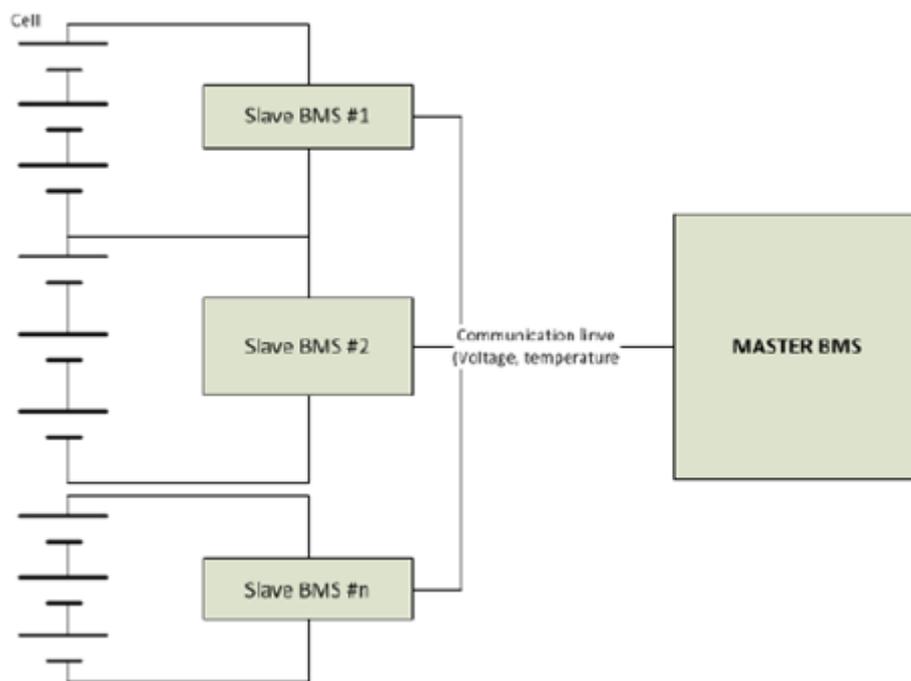


Figure 10 : BMS à architecture modulaire

Dans cette configuration, les BMS esclaves supervisent un sous-ensemble d'éléments :

- Mesurer la tension de chaque élément
- Mesurer la température des éléments
- Equilibrer la charge entre éléments au sein du module
- Envoyer ces informations au BMS maître

Le BMS maître a alors pour rôle de :

- Contrôler les contacteurs permettant de connecter la batterie à l'applicatif extérieur
- Superviser le courant, la tension et l'isolement du pack batterie
- Communiquer avec l'applicatif extérieur
- Contrôler la régulation en température

Cette configuration modulaire est la plus rencontrée dans les packs batteries de plusieurs kilowatts (véhicule électrique, stockage stationnaire), car elle présente plusieurs avantages :

- Le pack batterie est très souvent constitué de modules branchés en série. Ceci peut permettre à la tension de chaque module de rester suffisamment faible pour éviter un risque d'électrisation lors la fabrication ou de la maintenance de ces modules. La haute tension, pouvant engendrer une électrisation, n'est présente qu'une fois les modules connectés en série.
- Ce type de design est plus modulaire : il peut facilement être réutilisé pour le design de packs de capacité différente, simplement en ajoutant ou retirant des modules au sein du pack (diminution des coûts de conception)

Dans les applications nécessitant un stockage d'énergie encore plus important (exemple : stockage stationnaire), ce type d'architecture modulaire est repris, en y ajoutant un étage :

- Un BMS esclave est toujours intégré dans chaque module pour gérer l'acquisition des tensions et températures des éléments
- Un BMS de niveau intermédiaire supervise un ensemble de modules assemblés au sein d'un rack ou d'une armoire
- Le BMS maître est alors en en charge de la mise en parallèle des racks entre eux, et de leur connexion à l'applicatif extérieur.

D'après les informations obtenues lors de la conférence « AUTOMOTIVE BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS FOR EV/HEVS » de Berlin, cette architecture a été adoptée par la quasi-totalité des constructeurs de véhicules électriques (Volvo, Renault, PSA,...) [7]

Note : pour augmenter le niveau de sécurité, le BMS maître est parfois doublé. Une seconde carte électronique, regroupant toutes les fonctionnalités essentielles pour la sécurité, est ajoutée. Cette redondance permet de garantir que, même en cas de panne du BMS master, les fonctions essentielles pour la sécurité du pack batterie soient toujours assurées.

4.3 BMS distribué

Il s'agit de l'architecture du BMS ayant la granularité la plus fine. Chaque élément du pack batterie intègre une sous-partie du BMS.

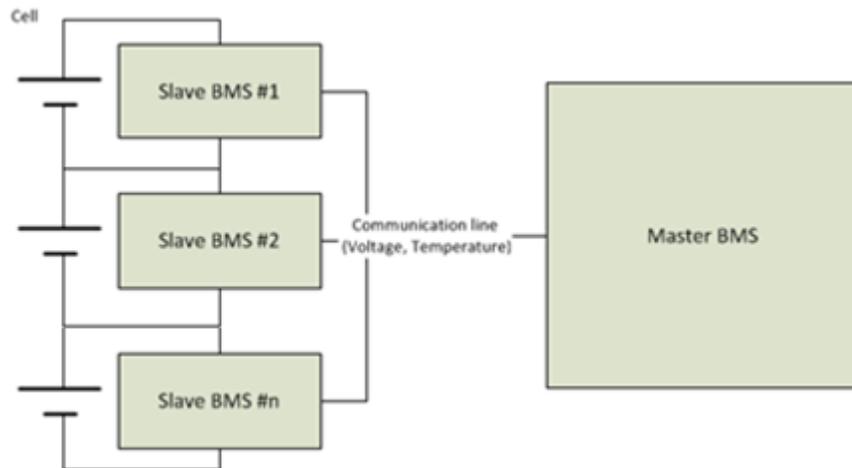


Figure 11: BMS à architecture distribuée [14]

L'intégration d'un BMS esclave localement, à chaque élément, peut avoir de nombreux atouts :

- Calcul plus précis des états de la batterie (SOC, SOH, SOL) et de la puissance admissible ou disponible (calcul réalisé élément par élément)
- Meilleure contrôle de l'utilisation de chaque élément dans ses limites électriques et thermiques
- Utilisation des performances maximales de chaque élément possible sans dégrader le niveau de sécurité
- Equilibrage plus performant des éléments, possible pendant la charge et pendant la décharge
- Mise à disposition d'information détaillée, élément par élément, pour la maintenance et la seconde vie

Comme de l'« intelligence » est embarquée au sein de chaque élément, on parle parfois de « smart cell » [15, 16].

Cette architecture a toutefois le désavantage d'être la plus coûteuse des trois solutions présentées. A notre connaissance, elle est peu utilisée pour le moment.

Toutefois, l'apparition de circuit intégré dédié (diminution des coûts) et la recherche d'une meilleure performance pourraient favoriser l'adoption de cette architecture dans un avenir proche [14].

Cette architecture semble pour le moment poussée par des start-up prônant l'augmentation des performances et de la sécurité (ex : e-move GmbH), mais n'a pas à notre connaissance été adoptée par les équipementiers automobile [7].

4.4 Autres exigences sur l'architecture matérielle

En cas de défaillance des différentes sondes de mesure (températures, tensions, courant), il faut éviter que la haute tension présente dans le pack ne puisse se propager jusqu'au BMS. En effet, un unique défaut de ce type pourrait rendre le BMS complètement hors-service.

Aussi, quelle que soit l'architecture matérielle, chacune des sondes (tension, température, courant) mesurant les caractéristiques de la partie puissance et envoyant cette information au BMS doit être isolée galvaniquement du BMS (aucune partie conductrice commune entre les câbles de mesure de tension et le BMS).

5 Ouverture

L'utilisation de batteries Li-Ion est en pleine expansion, et ceci devrait encore croître dans les années à venir. Face aux risques encourus, il nous semble important de poursuivre le travail sur la thématique des BMS. Voici les missions que nous pouvons envisager sur le sujet.

Poursuite de la veille technologique

L'importance et la complexité de mise en œuvre des BMS dans la sécurité des packs batterie peut se mesurer au nombre de publications scientifiques émises chaque année sur le sujet.

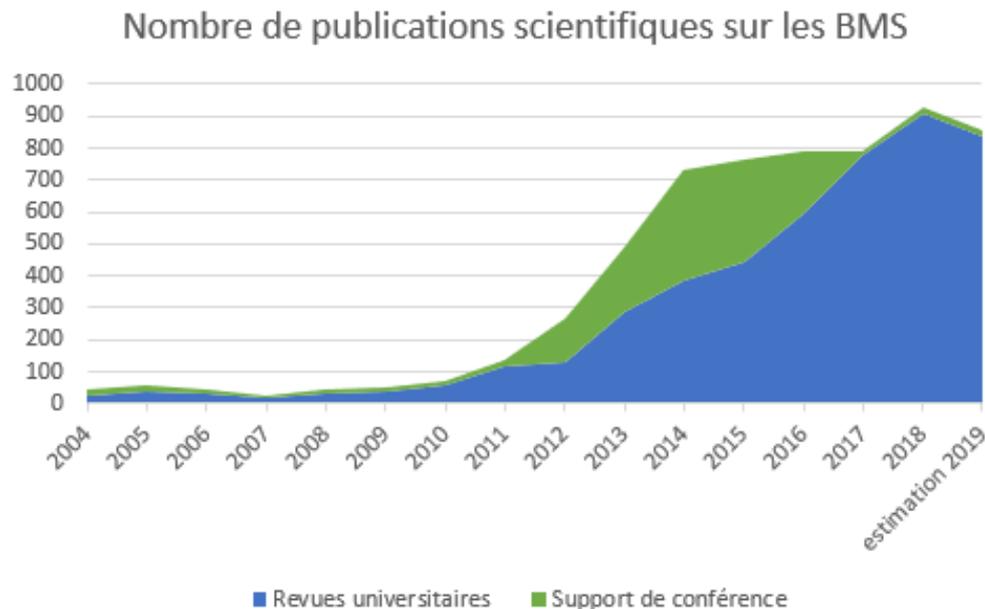


Figure 12 : Evolution du nombre de publications scientifiques annuelles contenant les termes "Battery Management System"
(Source : base de recherche EBSCO Article +, référençant la plupart des grands fournisseurs de contenus scientifiques anglo-saxons)

On voit sur ce graphique que la recherche sur les BMS a pris de l'ampleur dans le début des années 2010. Le nombre de publications contenant les termes « Battery Management System » a été multiplié par 7 depuis 2012, et dépasse 900 publications en 2018.

De nouvelles méthodes sont en cours de développement. Elles concernent tous les aspects du pack batterie, par exemple :

- Intégration de nouveaux types de capteurs
 - o Capteur de pression au sein des modules pour détecter plus rapidement leur dégazage,
 - o Capteur de température ou de contrainte mécanique directement dans les éléments pour mieux les superviser, ...
- Méthodes de détermination des états internes (SoC, SoH, SoF, SoL,...),
 - o Précision, avantage et inconvénient des différentes méthodes d'estimation évoquées brièvement dans ce document
- Gestion thermique des batteries par les BTMS
 - o Différentes technologies, existantes ou en développement
 - Refroidissement actif ou passif,
 - Matériau à changement de phase, ...
 - o Avantages et inconvénients de ces technologies

- Impact des nouvelles technologies de batteries sur les BMS :
 - o Nouvelles chimies (Sodium-Ion, Lithium soufre, ...)
 - o Couplage Li-Ion/Supercap (utiliser des éléments Li-Ion optimiser pour le stockage d'énergie, et profiter des performances instantanées des supercaps pour fournir les pics de puissance)

Chacune de ces thématiques est suffisamment importante pour nécessiter une note dédiée.

Une veille technologique continue sur la thématique est nécessaire pour maintenir nos compétences au niveau de l'état de l'art du domaine.

Être capable d'évaluer le niveau de sécurité d'un BMS dans toutes les situations

Aujourd'hui, quelques essais simples sont réalisés pour vérifier le comportement du BMS face à des défauts prévisibles. On peut principalement citer les essais de surcharge, de surdécharge, de court-circuit, et de surchauffe. Pour chacun de ces essais, le BMS doit isoler le pack batterie de l'applicatif extérieur avant qu'il y ait un dépassement des plages sûres d'utilisation des éléments Li-Ion.

Mais si nous souhaitons tester de façon plus exhaustive un BMS (exemples : comportement du BMS en cas de panne d'une des sondes de température ou de tension, en cas de bruit important sur ces mesures, comportement lorsque l'applicatif extérieur ne répond plus, lorsque les contacteurs n'agissent plus, précision des estimations des états internes SoC, SoP, SoH, ...), il faut être capable de jouer avec de nombreux paramètres simultanément.

Face à la difficulté de faire des essais réels avec un nombre de paramètres aussi important, il est possible d'utiliser une méthode appelée « HIL Testing » (Hardware In the Loop) : le BMS, chargé avec son logiciel final, est connecté à un système de test. Ce système de test va simuler le comportement du reste du véhicule électrique : capteurs (températures, courant, tensions, ...), actionneur (relais, contacteur, ...), contrôleur du véhicule, chargeur, ... En envoyant les stimulations adéquates, ce banc d'essai permet un test extensif de tous les scénarii qui peuvent être imaginés sur le terrain (défaillance de capteurs, imprécision de mesure, court-circuit, appel de courant trop important, ...).

Cette méthodologie, utilisée par les constructeurs automobiles [7], pourrait permettre de tester de manière plus exhaustive les fonctionnalités importantes pour la sécurité des BMS.

Dans un premier temps, notre démarche pourrait consister à valider avec les industriels du domaine l'intérêt d'un tel banc d'essai. En effet, ce banc d'essai a besoin de dialoguer avec le BMS : les constructeurs doivent donc accepter de nous donner les informations nécessaires pour mettre en œuvre cette communication. Ce projet est donc conditionné par l'intérêt que des industriels pourraient y trouver.

Contribution du BMS à la 2nde vie

Comme évoqué, dans l'électromobilité, un pack batterie est considéré comme étant en fin de première vie lorsqu'il a perdu environ 20 à 30 % de sa capacité de stockage d'énergie, et/ou que sa résistance interne a augmenté de 50 à 100 %. Ces critères de fin de première vie rendent les packs réutilisables pour d'autres applications (exemple : stockage stationnaire).

Nous avons vu à plusieurs reprises dans ce document que le BMS peut jouer un vrai rôle dans le reconditionnement de ces packs batterie en vue d'une utilisation seconde vie. Ils sont notamment capables d'enregistrer et de restituer des informations pertinentes sur les conditions d'utilisation du pack batterie en première vie.

La contribution du BMS au reconditionnement du pack batterie pourrait être améliorée par différents moyens (reprogrammation du logiciel du BMS, diminution de l'hétérogénéité thermique au sein du pack pour mieux homogénéiser le vieillissement des éléments, mise à disposition du protocole de communication avec le BMS, ...)

L'approfondissement de ces différents moyens, de leur intérêt vis-à-vis du reconditionnement, pourrait également faire l'objet d'une note dédiée. Cette note viendrait compléter le travail réalisé par l'Ineris sur cette thématique « Seconde Vie » (DRA 06 – opération Batterie).

Charge rapide et impact sur le BMS

Le BMS est au cœur des fonctionnalités de charge rapide : c'est lui qui a la responsabilité de définir le courant de charge maximum qui peut être accepté par le pack.

Les charges rapides mettent en œuvre des puissances électriques très importantes (600 kW pour les bus, 1400 kW pour les tramways). De tels niveaux de puissances exigent nécessairement une adaptation du BMS (réactivité, fréquence d'échantillonnage) et des différents organes de sécurité le composant (contacteur, fusible, ...).

Compte tenu du développement important des stations de charge rapide et de l'intérêt qu'elles représentent dans la transition vers la mobilité électrique, il semblerait pertinent d'approfondir ce sujet.

Normalisation

Réaliser une synthèse des normes applicables au BMS est une tâche ardue.

En effet, pour un type d'application donnée, il existe souvent plusieurs normes produits applicables. Ces normes couvrent l'ensemble du produit et peuvent contenir des exigences spécifiques pour le pack batterie.

A ces normes plutôt orientées vers le produit s'ajoutent les normes sur la sécurité des batteries. Ces normes peuvent également être différenciées par type d'application. Pour exemple, l'IEC 62619 couvre les applications industrielles. Cette norme est une « norme chapeau » : elle est la base de nombreuses autres normes, déjà publiées ou en cours de développement, qui couvrent chacune un type d'application : stockage stationnaire (IEC 63056), application mobile hors véhicule routier (chariot élévateur, voiturette de golf, ...) (IEC 63057), bateau, train, ...

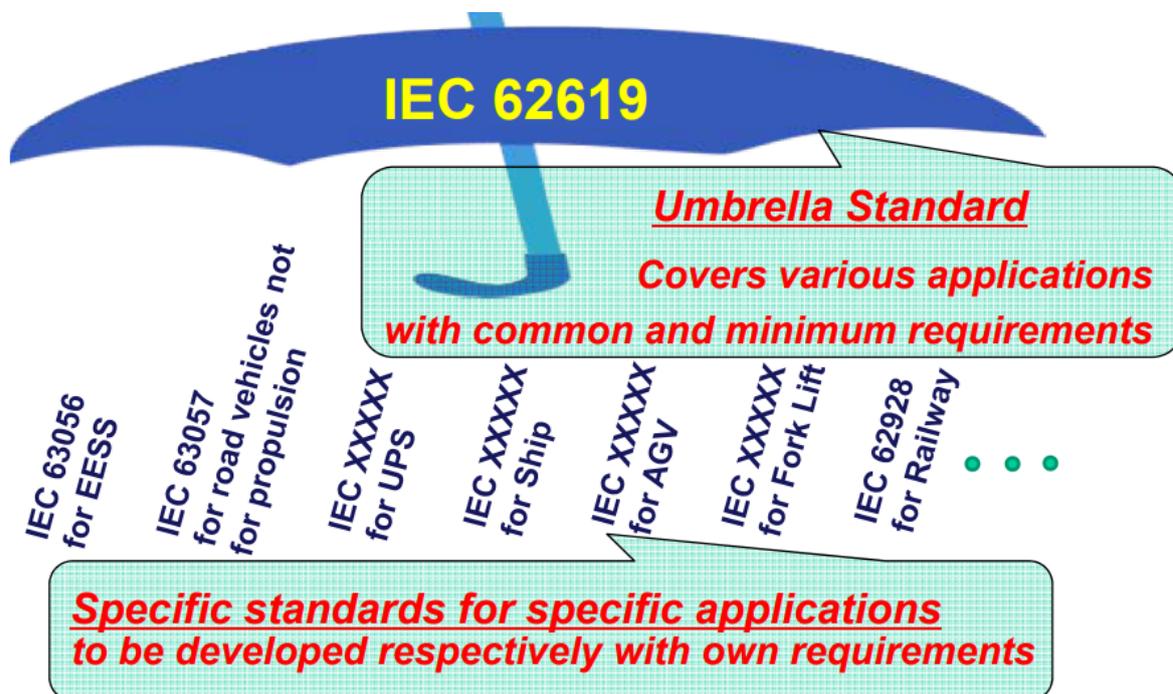


Figure 13 : Déclinaison de l'IEC 62619 dans différents types d'application [17]

La sécurité de fonctionnement ajoute également des exigences sur les fonctions importantes pour la sécurité (exemple : IEC 61508 : 2011, ou ISO 26262 :2018 dans le domaine automobile).

Le processus de charge et les chargeurs sont eux-mêmes régis par d'autres normes.

Concernant la normalisation dédiée au BMS, grâce à notre participation active au sein de l'IEC TC120, nous avons pu identifier la norme chinoise QC/T 897-2011 dédiée au BMS des véhicules électriques, ainsi qu'une proposition indienne pour la création d'une norme internationale IEC sur cette thématique.

Sans vouloir être exhaustif, l'approfondissement des normes applicables en fonction des applications peut nécessiter un intérêt réel.

6 Références

- [1] P. G. Balakrishnan, R. Ramesh, and T. Prem Kumar, "Safety mechanisms in lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 155, pp. 401-414, 2006/04/21/ 2006.
- [2] F. A. Administration, "Lithium Battery Thermal Runaway Vent Gas Analysis," *DOT/FAA/TC-15/59*, November 2016.
- [3] Y. Fernandes, A. Bry, and S. de Persis, "Identification and quantification of gases emitted during abuse tests by overcharge of a commercial Li-ion battery," *Journal of Power Sources*, vol. 389, pp. 106-119, 2018/06/15/ 2018.
- [4] A. Lièvre, "Development of lithium-ion battery management system for mild hybrid vehicles : state indicators determination (SoC, SoH and SoF)," Université Claude Bernard - Lyon I, 2015.
- [5] M. Lelie, T. Braun, M. Knips, H. Nordmann, F. Ringbeck, H. Zappen, *et al.*, "Battery Management System Hardware Concepts: An Overview," *Applied Sciences*, vol. 8, 2018.
- [6] E. McTurk, T. Amietszajew, J. Fleming, and R. Bhagat, "Thermo-electrochemical instrumentation of cylindrical Li-ion cells," *Journal of Power Sources*, vol. 379, pp. 309-316, 2018/03/01/ 2018.
- [7] J. LESAGE, "Compte-rendu de la conférence « AUTOMOTIVE BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS FOR EV/HEVS », " presented at the AUTOMOTIVE BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS FOR EV/HEVS, Berlin, 2019.
- [8] D. G. L. Plett, "Algorithms for Battery Management Systems - Introduction to Battery Management Systems," U. o. Colorado, Ed., ed: Coursera.
- [9] C. Pastor-Fernández, K. Uddin, G. H. Chouchelamane, W. D. Widanage, and J. Marco, "A Comparison between Electrochemical Impedance Spectroscopy and Incremental Capacity-Differential Voltage as Li-ion Diagnostic Techniques to Identify and Quantify the Effects of Degradation Modes within Battery Management Systems," *Journal of Power Sources*, vol. 360, pp. 301-318, 2017/08/31/ 2017.
- [10] B. Xiong, R. Chen, F. Zeng, J. Kang, and Y. Men, "Thermal shrinkage and microscopic shutdown mechanism of polypropylene separator for lithium-ion battery: In-situ ultra-small angle X-ray scattering study," *Journal of Membrane Science*, vol. 545, pp. 213-220, 2018/01/01/ 2018.
- [11] J. Kim, J. Oh, and H. Lee, "Review on battery thermal management system for electric vehicles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 192-212, 2019/02/25/ 2019.
- [12] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834-854, 2017/10/01/ 2017.
- [13] M. S. H. Lipu, M. A. Hannan, A. Hussain, M. M. Hoque, P. J. Ker, M. H. M. Saad, *et al.*, "A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations," *Journal of Cleaner Production*, vol. 205, pp. 115-133, 2018/12/20/ 2018.
- [14] A. Ba, "From the Vehicle to the BMS: How Systems Engineering can Reduce the Cost of Development," presented at the Automotive Battery Management Conference, 2018.
- [15] D. F. Frost and D. A. Howey, "Completely Decentralized Active Balancing Battery Management System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, p. 729, 01// 2018.
- [16] S. Steinhorst, M. Lukasiwycz, S. Narayanaswamy, M. Kauer, and S. Chakraborty, "Smart Cells for Embedded Battery Management," in *2014 IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications*, 2014, pp. 59-64.
- [17] H. Shima. (2016). *Safety related international standards* [Powerpoint presentation]. Available: <https://www.prba.org/wp-content/uploads/13-Safety-related-international-standards.pdf>
- [18] W. C. Ltd. *Battery and Energy Technologies : Battery Management Systems (BMS)*. Available: <https://www.mpoweruk.com/bms.htm>
- [19] B. Eckhouse. (2019). *Explosions Threatening Lithium-Ion's Edge in a Battery Race*. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-04-23/explosions-are-threatening-lithium-ion-s-edge-in-a-battery-race>
- [20] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, and X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 10, 05/29 2017.
- [21] A. T. Staff. (2019). *Tesla's China inroads hit by car explosion*. Available: <https://www.asiatimes.com/2019/04/article/teslas-china-inroads-hit-by-car-explosion/>

- [22] F. Lambert. (2019). *Tesla is updating its battery software following a car fire, claims improve longevity*. Available: <https://electrek.co/2019/05/15/tesla-fire-update-battery-software/>
- [23] P. Bédard. (2016). *Tesla fera une mise à jour de la Model S après l'incendie d'une voiture en Norvège*. Available: <https://www.aveq.ca/actualiteacutes/tesla-fera-une-mise-a-jour-de-la-model-s-apres-lincendie-dune-voiture-en-norvege>

7 Glossaire

BMS :	Battery Management System (système de gestion de batterie)
CID :	Current Interrupting Device (dispositif mécanique permettant de déconnecter physiquement l'élément du circuit électrique en cas de surpression interne à l'élément)
NTC :	Negative Temperature Coefficient (composant électronique ayant la particularité de voir sa résistance diminuer avec la température, ce qui lui permet d'être notamment utilisé pour la mesure de température)
PTC :	Positive Temperature Coefficient (composant électronique ayant la particularité de voir sa résistance augmenter avec la température, ce qui lui permet d'être notamment utilisé en tant que limiteur de courant lorsque sa température devient trop élevée)
SOC :	State Of Charge (état de la charge de la batterie, en pourcentage de la capacité actuelle de la batterie)
SOH :	State Of Health (état de santé d'un élément, en pourcentage de la capacité initiale)
SOL :	State Of Life (durée restante avant que la batterie n'atteigne les critères de fin de vie (ou tout du moins fin de première vie)
RUL :	Remaining Usefull Life (durée restante avant que la batterie n'atteigne les critères de fin de vie (ou tout du moins fin de première vie)
SOF :	State of Function (niveau de disponibilité du pack batterie, défini sur mesure par rapport au besoin spécifique de l'application)
Élément :	également appelé cellule, il s'agit du plus petit élément électrochimique utilisé dans la fabrication d'un pack batterie. Les piles AA, ou les accumulateurs 18650 sont des exemples d'élément.
Module :	Ensemble d'éléments interconnectés, formant un sous-ensemble d'un pack batterie. Les modules peuvent contenir de l'électronique pour assurer leur supervision.
Pack batterie :	Ensemble de modules interconnectés, de dispositif de contrôle /commande permettant de stocker et fournir la puissance électrique nécessaire à une application .

8 Liste des annexes

- Annexe 1 : contribution des différents dispositifs de sécurité à la sécurité globale du pack
1 page
- Annexe 2 : informations contenues dans le BMS pouvant aider au reconditionnement – 2 pages
- Annexe 3 : accidentologie – 3 pages

Annexe 1 : contribution des différents dispositifs de sécurité à la sécurité globale du pack

La figure ci-dessous présente de façon très visuelle le résultat d'une analyse de risques d'un pack batterie.

Elle propose une synthèse non-exhaustive de différents dispositifs de protection intégrés au sein d'un pack batterie, et la contribution de chacun de ces dispositifs dans l'évitement d'un emballement thermique.

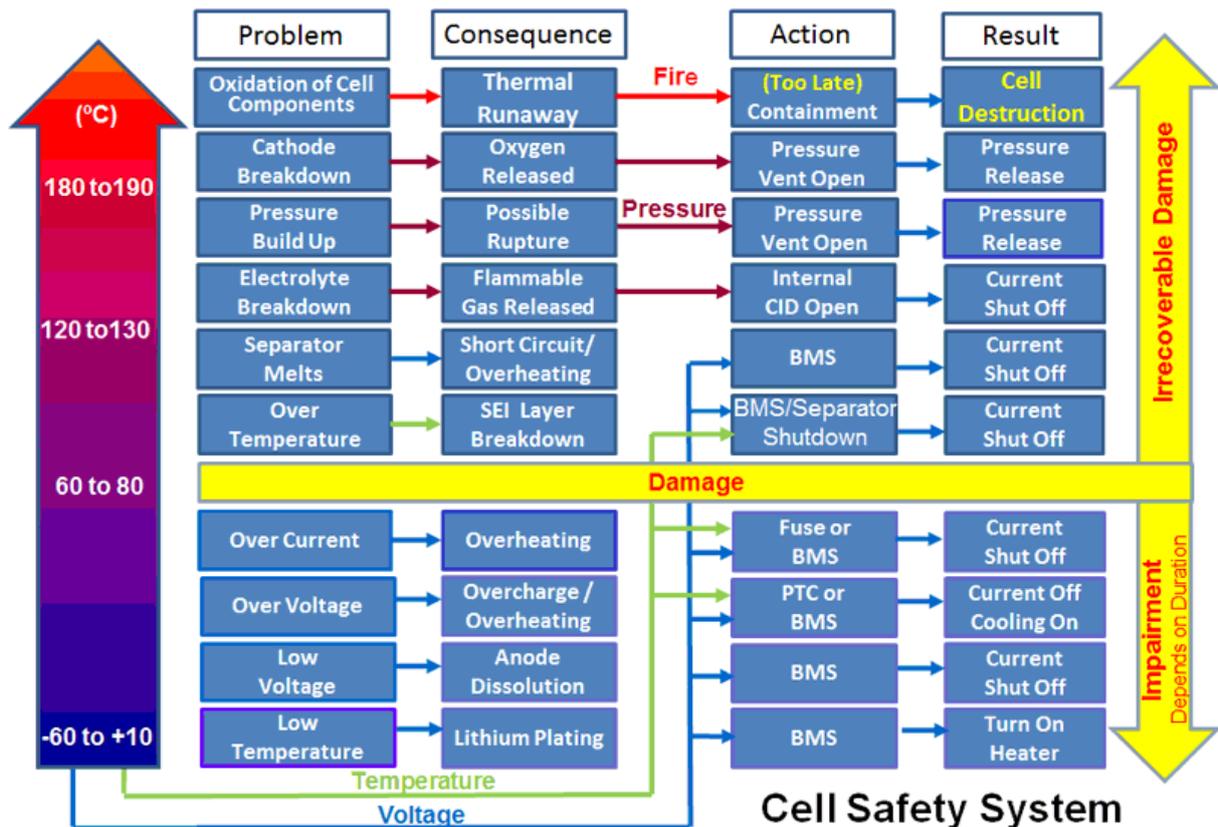


Figure 14 : Contribution de différents dispositifs de protection dans l'évitement d'un emballement thermique [18]

Annexe 2 : informations contenues dans le BMS pouvant aider au reconditionnement

Comme évoqué plus haut dans ce document, la norme UL 1974 liste dans son annexe A toutes les informations couramment connues par le BMS, et qui peuvent être stockées dans sa mémoire interne pour aider au reconditionnement du pack batterie pour une utilisation seconde vie :

Measurement parameters which may be measured by BMS
Capacity (kAh or kWh):
Measured Capacity
Charge Capacity (total) over lifetime (kAh or kWh)
Discharge Capacity (total) over lifetime (kAh or kWh)
Total charge and discharge capacity over lifetime (kAh or kWh)
Current (A):
Maximum charge current over lifetime
Maximum discharge current over lifetime
Current distribution during charge and discharge over lifetime
Maximum specified current limit exceeded ^{a)}
Voltage (Vdc):
Maximum charge voltage
Minimum discharge voltage
Average cell voltage over lifetime
Maximum cell voltage over lifetime (ID cell)
Minimum cell voltage over lifetime (ID cell)
Battery voltage distribution over lifetime
Average cell voltage distribution over lifetime
Module voltage distribution over lifetime
Maximum cell charge voltage limit exceeded (ID cell) ^{a)}
Minimum cell discharge voltage limit exceeded (ID cell) ^{a)}
Power (kW):
Maximum charge power over lifetime
Maximum discharge power over lifetime
Power distribution during charge and discharge over lifetime
State of Charge (SOC) (%):
Maximum SOC over lifetime
Minimum SOC over lifetime
SOC distribution over lifetime (off and on times)
Temperature (°C):
Maximum and minimum cell temperature over lifetime (ID cell)
Maximum electronics temperature over lifetime
Maximum and minimum cell temperature distribution over lifetime
Maximum electronics temperature distribution over lifetime
Maximum temperature limited exceeded (ID cell) ^{a)}
Minimum temperature limit exceeded (ID cell) ^{a)}
Time (h):
Lifetime since production
Battery on over lifetime
Battery on charging over lifetime
Battery on discharging over lifetime

Measurement parameters which may be measured by BMS
Battery on balancing
Battery off over lifetime
Total time for cells in overvoltage condition ^{a)}
Total time for cells below low voltage limit ^{a)}
Total time for cells in overheated condition in charge and discharge ^{a)}
Total time for cells below low temp limit in charge and discharge ^{a)}
Total time for cells in overcurrent condition under charge and discharge ^{a)}
Internal Resistance (Ω):
Measured
Measured vs specified
Error Messages:
Number or type of BMS error messages recorded (error memory) ^{b)}
Times contactor(s) switched under load (error indicator) ^{b)}
^{a)} Out of specification limits indicators may be a signal for rejection of the battery for repurposing. See 18.3 and 18.5. ^{b)} Increase in error messages recorded above anticipated normal limit would suggest a problem with BMS or other problems with battery. An error message limit needs to be determined as cause for rejection of batteries for repurposing. See 18.3.

Figure 15 : Informations contenues dans le BMS pouvant aider au reconditionnement du pack batterie.
Appendix A de l'UL 1974:2018

Annexe 3 : Accidentologie

Lors d'un emballement thermique d'un pack batterie, il est souvent difficile a posteriori d'en déterminer la cause avec certitude. Malgré tout, nous avons pu trouver des accidents dont les investigations laissent penser à une défaillance ou un mauvais paramétrage du BMS.

Stockage stationnaire :

En Corée du Sud, de nombreux accidents ont été enregistrés dans des stockages stationnaires. Voici quelques chiffres significatifs qui nous ont été communiqués de manière informelle :

- 575 stockages stationnaires sont recensés en Corée du Sud,
- 15 accidents se sont produits en 2018, puis 2 accidents en Janvier 2019,
- Sur 7 accidents expertisés, 4 mettent en cause un dysfonctionnement du BMS.

Deux accidents sur des stockages stationnaires aux Etats-Unis ont également été relatés par les médias américains. Le premier date de 2012 dans une entreprise de Flagstaff, et le second s'est produit en Arizona en Avril 2019. Ce second accident a attiré l'attention des médias américains et des autorités locales, qui souhaitent garantir la sécurité de leurs concitoyens [19]. La cause de l'accident n'est pas encore identifiée.



Figure 16 : Accident sur un stockage stationnaire à Flagstaff (Etats-Unis)
(Image diffusée par ABC15)

Bus électrique :

En Avril 2015 à Shenzhen (Chine), un bus électrique a pris feu car le BMS n'a pas détecté la fin de charge. Le pack a donc été surchargé, ce qui a provoqué un emballement thermique. Le feu s'est ensuite propagé au reste du bus [20].



Figure 17 : Incendie d'un bus (Chine, 04/2015) dû à la défaillance du BMS pendant la charge

Toujours à Shenzhen (Chine), en Avril 2016, un autre bus électrique a pris feu. La cause de cet incident serait un court-circuit électrique dû à la détérioration d'un fil conducteur [20]. Même si ce n'est pas une défaillance directe du BMS, il est possible qu'un BMS très réactif, ou un BMS à architecture distribuée, aurait pu déconnecter la batterie du reste du véhicule avant que l'emballement thermique ne se produise.

Voiture électrique :

D'autres emballements thermiques ont été constatés sur des voitures électriques.

On peut notamment citer l'emballement thermique spontané du pack batterie d'une Tesla Model S dans un parking souterrain de Shangaï (Chine) en Avril 2019. Le véhicule était à l'arrêt depuis une demi-heure et n'était pas en charge lorsqu'une fumée est apparue, suivie d'importantes flammes [21].



Figure 18 : Incendie d'une Tesla Model S dans un parking souterrain chinois. Véhicule à l'arrêt depuis 30 mn, pas de recharge en cours.

À la suite de cet incendie (et de celui de Pittsburg une semaine plus tôt), Tesla a décidé de mettre à jour le firmware du BMS (logiciel embarqué dans le BMS, en quelque sorte le « cerveau » de celui-ci) des Model S et Model X, pour en améliorer les paramètres de gestion thermique et de gestion de charge [22].

Ce n'est d'ailleurs pas la première fois que Tesla met à jour le firmware des BMS de ses voitures électriques à la suite d'un incident. En effet, une telle mesure avait déjà été mise en œuvre par Tesla après l'incendie de Janvier 2016 d'une Model S en Norvège. L'incident avait démarré pendant la charge du véhicule par un super-chargeur Tesla. L'expertise a montré que le feu a démarré dans le véhicule, à cause d'un court-circuit à l'intérieur d'une boîte de distribution [23]. La mise à jour du firmware du BMS consécutive à l'accident laisse penser que celui-ci aurait pu prévenir cet incendie.

Moto électrique :

Lors d'un grand prix Moto GP cette année 2019, l'une des motos électriques devant participer à la course Enel MotoE (championnat international de moto électrique) a pris feu lors de sa charge.

Cet incident fait suite à un autre incendie, quelques mois auparavant, lors des essais de ces motos électriques sur le circuit espagnol de Jerez, et qui avait détruit les 18 motos devant participer à la compétition.



Figure 19 : Incendie du paddock MotoE sur le circuit de Jerez , Mars 2019

Même si l'origine de ces incendies n'est pas formellement identifiée, ils se sont dans les deux cas, déclarés pendant la charge, pendant laquelle les fonctions de sécurité du BMS doivent assurer aux éléments en charge des courants, tensions et températures compatibles avec leur plage d'utilisation sûre.

Cette accidentologie est loin d'être exhaustive. Elle montre toutefois que la sécurité de tous les types d'applications utilisant des pack batterie Li-Ion peut être impactée par un mauvais paramétrage ou un dysfonctionnement de leur BMS.

Etant donné le rôle crucial du BMS dans la sécurité, il n'est pas surprenant que sa défaillance puisse être la cause d'accidents. Ceci démontre l'importance de la fiabilité des BMS dans la sécurité des batteries.

