

RAPPORT D'ÉTUDE

06/06/2011

DRA-10-111085-11390D

**Approche de la maîtrise des risques spécifiques de
la filière véhicules électriques**

Analyse préliminaire des risques

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES

INERIS

Liste des personnes ayant participé à l'étude : G. MARLAIR, L. DUPONT,
M. DEMISSY

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

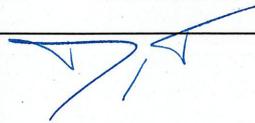
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	G. MARLAIR L. DUPONT	D. TIGREAT	M. DEMISSY
Qualité	Pôle Substances et Procédés Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité Caractérisation des Substances et Réactions Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle Substances et Procédés Direction des Risques Accidentels
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. AVANT PROPOS	5
2. INTRODUCTION.....	6
2.1 Contexte et objectifs de l'étude	6
2.2 Structure de l'étude	6
2.3 Périmètre de l'étude	7
3. METHODOLOGIE D'ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES	9
4. DESCRIPTION ET INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE.....	12
4.1 Production des électrodes, électrolytes et séparateurs des batteries Li-ion	13
4.2 Fabrication des cellules	14
4.3 Utilisation.....	16
4.4 Recyclage / Mise en rebut.....	18
5. ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES	21
5.1 Typologies des risques lies aux batteries	21
5.1.1 Risques électriques.....	21
5.1.2 Risques mécaniques.....	26
5.1.3 Risques liés aux stockages des carburants (essence ou diesel)	28
5.1.4 Risques chimiques.....	29
5.2 Gestion de la sécurité.....	34
5.3 Synthèse des risques liés aux batteries	37
5.4 Risques spécifiques liés aux principales étapes du cycle de vie des VE....	39
5.4.1 Conception.....	39
5.4.2 Fabrication	40
5.4.3 Charge des batteries.....	42
5.4.4 Transport	47
5.4.5 Stockage.....	49

5.4.6 Intervention / Service de secours.....	51
5.4.7 Seconde vie et Recyclage	55
5.5 Analyse préliminaire des risques (APR) pour l'ensemble du cycle de vie des véhicules électriques	59
6 CONCLUSIONS.....	60
7 REFERENCES.....	65
8 LISTE DES ANNEXES	67

1. AVANT PROPOS

Le travail mené par l'INERIS dans le cadre de ses programmes financés par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement vise à réaliser une cartographie des enjeux relatifs aux risques accidentels que pourraient présenter les véhicules électriques sur l'ensemble de leur cycle de vie (production, utilisation, recharge, fin de vie).

Cette étude fait appel à la définition de scénarios de risques (événements et les effets néfastes associés : incendie, explosion, dispersion de gaz toxiques...). Au nombre d'une cinquantaine, ils ont été définis en lien avec les différents acteurs de la filière (14 industriels ont été questionnés). Cette partie plus particulièrement développée dans le présent document rend donc compte d'une « analyse préliminaire des risques » classant ces scénarios par risque potentiellement croissant.

La méthodologie utilisée pour cette analyse retient deux motifs susceptibles de qualifier un scénario de "majeur" :

- Les études existantes et/ou le retour d'expérience font apparaître que le risque, dans le contexte du scénario, est avéré.
- La documentation et les connaissances existantes sont insuffisantes pour écarter un scénario de la liste des "risques majeurs".

Dans le second cas, les conclusions se traduisent par des recommandations sur le développement de compétences ou l'acquisition de connaissances supplémentaires, qui permettraient de préciser le niveau de criticité, et le cas échéant d'écarter ce scénario de la liste des scénarios majeurs.

Par ailleurs, il est important de noter que l'objet de l'étude ne porte pas sur les impacts sanitaires et environnementaux ; cependant, les informations de cette nature, recueillies au cours de ce travail, ont été citées. Elles n'ont à ce titre aucun caractère d'exhaustivité.

Enfin, cet état de l'art basé sur des revues documentaires et des entretiens, et pour lequel l'INERIS n'a pas conduit d'études expérimentales, se fonde sur les données scientifiques et techniques disponibles à fin novembre 2010.

2. INTRODUCTION

2.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'industrie automobile innove pour répondre aux objectifs du Grenelle de l'Environnement de réduction de 20% des émissions de CO₂ liées au transport, à l'horizon 2010. Pour cela, le déploiement massif des véhicules électriques (VE) et des véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle) offre un potentiel de réduction de consommation du pétrole et d'autres ressources d'énergie émettant du CO₂ [1].

Le Président de la République et le gouvernement ont donc décidé en 2009 de soutenir « les efforts de R&D des constructeurs automobiles français sur les modèles hybrides ou électriques » à hauteur de 400 M€.

Le développement de cette filière ne peut être réalisé que dans des conditions d'acceptation sociétale. Cette acceptation passe par des performances satisfaisantes à un coût raisonnable mais elle nécessite aussi des conditions de sécurité reconnues et acceptées.

Dans une perspective de développement durable, la création d'une telle filière énergétique doit s'affranchir des dangers éventuels non seulement de l'usage mais aussi de l'ensemble du cycle de vie, de la production des éléments à leur destruction ou recyclage.

La DGEC et la DGPR ont donc sollicité l'INERIS pour :

- réaliser une identification et une analyse préliminaire des risques de cette filière technologique (pur électrique et hybride) sur l'ensemble de son cycle de vie,
- envisager des ébauches de solutions pour maîtriser les risques les plus critiques ceci dès la mise sur le marché des premiers véhicules.

La présente étude a donc pour principal objectif de répondre à ces deux questions.

2.2 STRUCTURE DE L'ETUDE

Le déploiement à grande échelle de la filière « véhicule électrique » implique pour les transports individuels et collectifs, des bouleversements profonds au-delà de l'électrification des véhicules proprement dite, aussi bien des habitudes de conduite, que des différentes infrastructures à mettre en place (stations de charges, installations de maintenance et de réparation...) ou de filières de recyclage, encore quasiment inexistantes pour les nouvelles technologies envisagées dans les véhicules.

Ces modifications vont s'accompagner de l'émergence de nouveaux risques qu'il est primordial d'identifier rapidement afin de pouvoir les évaluer et proposer les principales mesures à mettre en place pour pouvoir les prévenir.

Pour cette étude, nous avons:

- recensé et décrit les principales technologies de stockage d'énergie susceptibles d'être mises en œuvre dans les prochaines années, afin d'avoir une idée précise des risques qu'elles peuvent engendrer, (**Rapport N°1 : « Données de base sur les différentes technologies de stockage d'énergie »**) ;
- fait une description du contexte réglementaire et normatif portant sur la filière, afin d'identifier les secteurs déjà couverts par ces textes et les éventuels domaines qu'il est encore nécessaire de couvrir, (**Rapport N°2 : « Revue du contexte réglementaire et normatif »**) ;
- recensé et analysé les principaux incidents/accidents ayant impliqué des systèmes de stockage électrochimiques ainsi que les dispositifs les mettant en œuvre (applications portables notamment) au cours des différentes phases de leur cycle de vie (fabrication, transport, recyclage...) au niveau international, (**Rapport N°3 : « Accidentologie »**).

A partir de ces premiers documents et des nombreux entretiens conduits avec les différents acteurs intervenant sur le véhicule électrique, nous avons réalisé une analyse préliminaire des risques des différentes étapes du cycle de vie de la filière (**objet du présent document**).

Le présent rapport contient également des ébauches de solutions pour contribuer à la sécurisation de cette filière. Certaines de ces solutions sont purement techniques et ne pourront être développées que par les industriels. D'autres, au contraire, qui concernent la réglementation ou la normalisation, devront être mises en œuvre conjointement par différents acteurs, pouvoirs publics, instances de normalisation, voire nécessiteront la mise en place d'actions au niveau international.

2.3 PERIMETRE DE L'ETUDE

Les risques pris en compte dans cette étude, se réfèrent essentiellement aux situations potentiellement accidentelles. Les impacts sanitaires et environnementaux à plus ou moins long terme ne sont pas examinés sauf s'ils ont été explicitement mentionnés lors des entretiens.

Cette étude traite l'ensemble des filières des différents types de véhicules tout électriques et électriques hybrides suivants:

- les cycles électriques (motos, scooters et vélos à assistance électrique) : les véhicules de catégorie L1 – L5,
- les quadricycles électriques : les véhicules de catégorie L6 – L7,
- les véhicules des catégories M1 et N1.

Cette étude est centrée sur les risques liés à la mise en œuvre des batteries dans les phases :

- de conception,
- de fabrication,
- de transport,
- de stockage,

- d'usage en liaison avec le véhicule (roulage) ou en liaison avec les infrastructures de réseau (charge/décharge) et de stationnement (parking, garage),
- d'intervention des services de secours,
- d'élimination en fin de vie.

Les choix technologiques, aussi bien en ce qui concerne les stockages d'énergie que les différents équipements et installations de la filière, étant encore loin d'être arrêtés, nous nous sommes concentrés sur les options principalement envisagées aujourd'hui. Le but n'était pas de recenser tous les risques de manière exhaustive mais d'identifier ceux qui proviennent principalement du remplacement du véhicule conventionnel par le véhicule électrique.

Différentes technologies de batteries, telles que les batteries au plomb (Pb), les batteries au nickel (NiMH, NiCd) et les batteries au Lithium (Lipo et Li-ion) sont actuellement disponibles [2], [7]. Les batteries au Lithium devraient cependant s'imposer dans les prochaines années au niveau de l'électro-mobilité. Parmi les batteries au Lithium, les batteries Li-ion sont en plein essor actuellement [8].

L'étude focalise donc sur les technologies de batteries Li-ion [2], principalement envisagées par les constructeurs automobiles mais aborde aussi ponctuellement d'autres technologies envisagées (Li Métal, Ni MH, supercapacités...)

Les véhicules électriques fonctionnant avec les piles à combustibles n'ont pas été traités dans le cadre de cette étude.

3. METHODOLOGIE D'ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES

La démarche de cette étude est résumée dans la figure 1 ci-dessous.

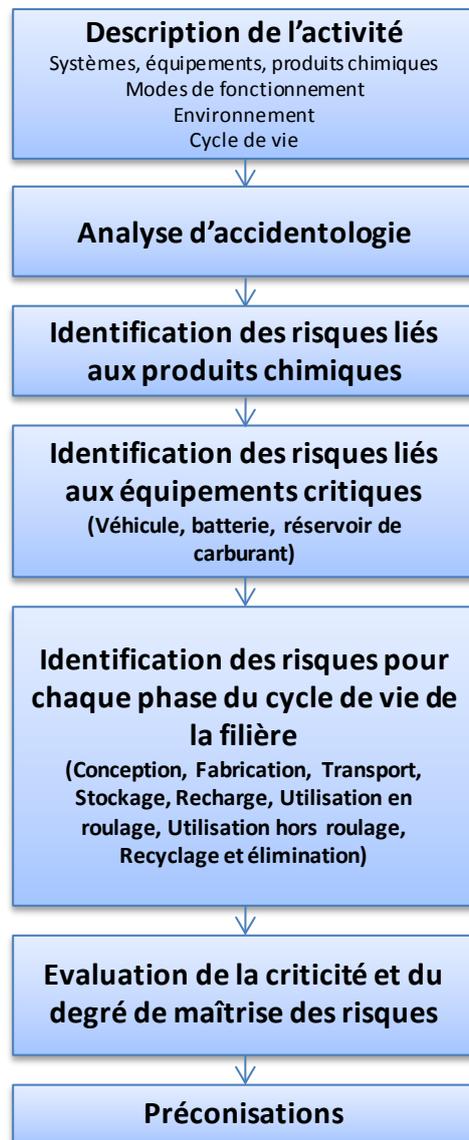


Figure 1 : Démarche de l'analyse préliminaire des risques

Cette analyse préliminaire des risques aboutit à une première cartographie des risques réalisée en évaluant la criticité et le degré actuel de maîtrise des risques. L'objectif d'une telle cartographie est de souligner les points cruciaux susceptibles de freiner le développement de la filière et qu'il est donc nécessaire de traiter en priorité.

Etant donné les enjeux et les nombreuses incertitudes liées à la mise en place de cette filière, concernant les choix des technologies et les futurs volumes impliqués, les cotations ne peuvent être qu'indicatives et les résultats doivent être considérés avec précaution.

Le but de cette cotation est principalement d'identifier les scénarios d'accident potentiels méritant une réflexion approfondie en termes d'études de risques, d'acquisition de connaissances et de mesures pertinentes de réduction des risques. La criticité de ces scénarios au sens conventionnel du terme (probabilité x gravité) n'est pas accessible. En particulier, toute exploitation statistique en termes de prévision de fréquence d'accidents potentiels est clairement inappropriée à ce jour.

Les critères proposés pour évaluer la criticité et la maîtrise des risques sont détaillés ci-dessous.

Criticité des Risques

La criticité des risques est déterminée selon 4 niveaux en fonction d'une appréciation des conséquences potentielles liées:

- aux pertes financières,
- à l'importance de l'impact sur les cibles (environnement, hommes, faune, flore...),
- à l'importance des moyens d'intervention,
- à l'importance des quantités de matières dangereuses stockées.

Aucun seuil quantitatif n'a été fixé sur les niveaux, ceux-ci correspondant approximativement à un impact :

- 4 : très important,
- 3 : important,
- 2 : sérieux,
- 1 : faible.

Maîtrise des risques

Le degré de maîtrise des risques est également estimé selon 4 niveaux d'importance en fonction de l'état :

- des connaissances scientifiques et techniques,
- des mesures de maîtrise des risques en place,
- du retour d'expérience,
- des barrières réglementaires et normatives.

Une matrice détaillant chaque seuil est présentée ci-dessous :

Maîtrise des risques : Besoin de développement en connaissances/compétences	1	2	3	4
Maturité	Très bonne maîtrise des risques	Bon degré de maîtrise pressenti	Problématique considérée voire étudiée	Aucune visibilité
Mesures de maîtrise des risques	Mesures de maîtrise des risques optimisées et adoptées par les industriels	Mesures de maîtrise des risques éprouvées et en cours de diffusion chez les industriels	Peu de mesures de maîtrise des risques identifiées	Pas de mesures de maîtrise des risques identifiées
Retour d'Expérience (REX)	REX disponible important	REX sur les technologies considérées	REX peu connu ou connu pour des situations proches	Pas de recul, pas de REX
Cadre réglementaire et normatif	Barrières réglementaires et normatives existantes et éprouvées	Barrières réglementaires et normatives en cours de révision ou de finalisation	Barrières réglementaires ou normatives en cours de réflexion et de développement	Pas d'encadrement normatif ou réglementaire

4. DESCRIPTION ET INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

Pour les véhicules étudiés, et pour lesquels les principales fonctions sont rappelées en annexe 2, nous avons considéré les risques associés au cycle de vie dont les principales étapes sont illustrées sur la figure 2 ci-dessous.

La France étant a priori peu concernée par les activités d'extraction des minerais (sauf via des investissements financiers), les risques propres à ces étapes ne sont pas abordés par cette étude.

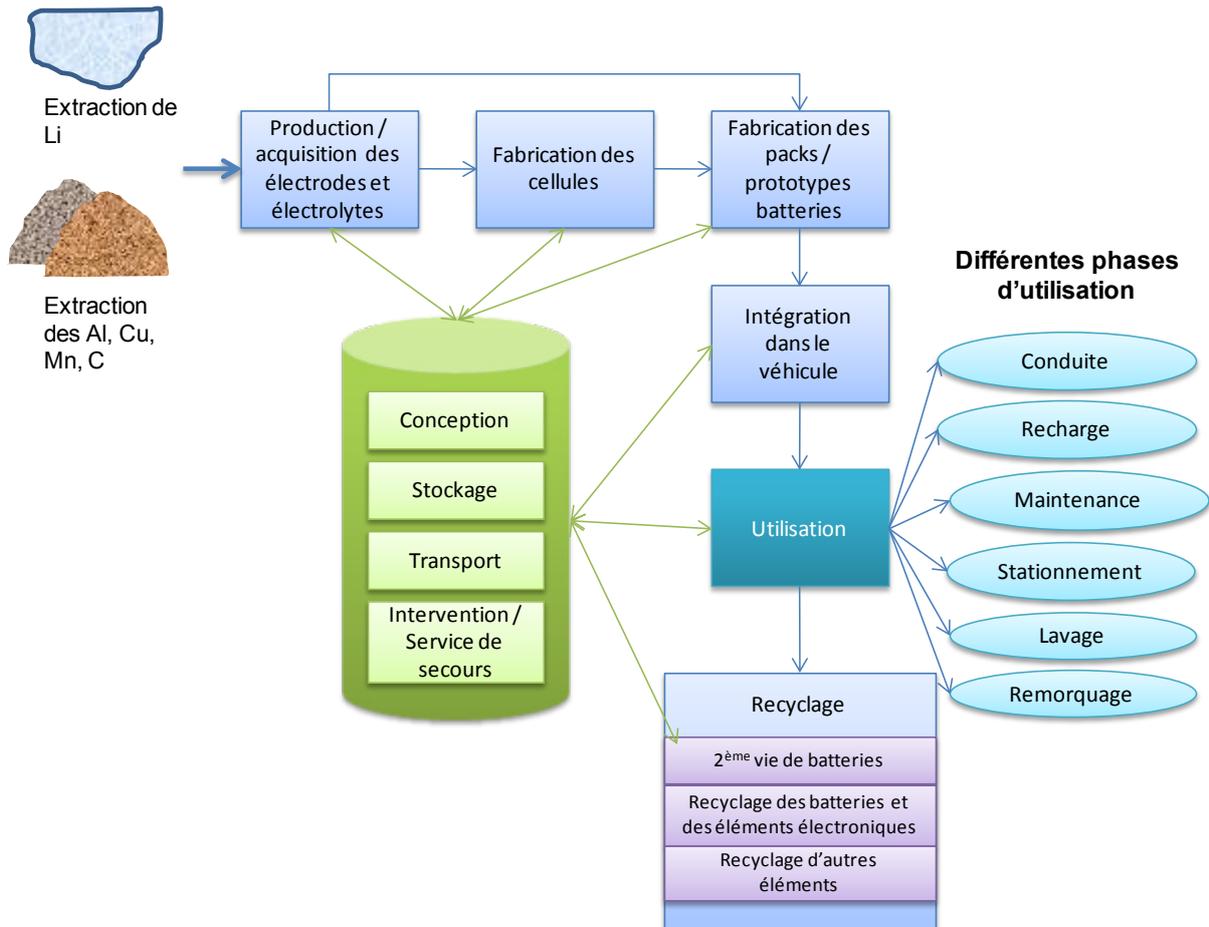


Figure 2 : Cycle de vie des véhicules tout électriques et électriques hybrides

A noter que les phases de conception, stockage, transport et intervention concernent toutes les étapes du cycle de vie.

4.1 PRODUCTION DES ELECTRODES, ELECTROLYTES ET SEPARATEURS DES BATTERIES LI-ION

- **Extraction des éléments Li, Al, Cu, Mn, C, etc.**

Les extractions des éléments Li, Al, Cu, Mn, C, etc. sont des activités industrielles potentiellement très polluantes et énergivores. Les produits issus de ces activités sont principalement du carbonate de lithium Li_2CO_3 , du graphite et des métaux (Al, Cu...).

On signalera que le déploiement du VE au niveau mondial impactera significativement la production mondiale et l'utilisation du Lithium mais n'affectera a priori que très peu les marchés des autres métaux utilisés dans les batteries. Cependant, certains métaux de transition utilisés dans les cathodes (Co, Mn...) pourraient également être utilisés en grandes quantités en fonction de l'évolution des technologies.

Comme précisé ci-dessus, l'activité d'extraction est réalisée en quasi-totalité hors du territoire national.

- **Production des électrodes**

La figure 3 illustre le procédé de fabrication des électrodes. Celui-ci est très semblable pour chacune des deux électrodes constitutives des cellules. Elles sont réalisées par utilisation de technologies « films minces », consistant en l'application, tant pour la cathode que pour l'anode de batteries au lithium-ion de couches de revêtements successives de matériaux actifs sur des films métalliques (aluminium et cuivre, généralement).

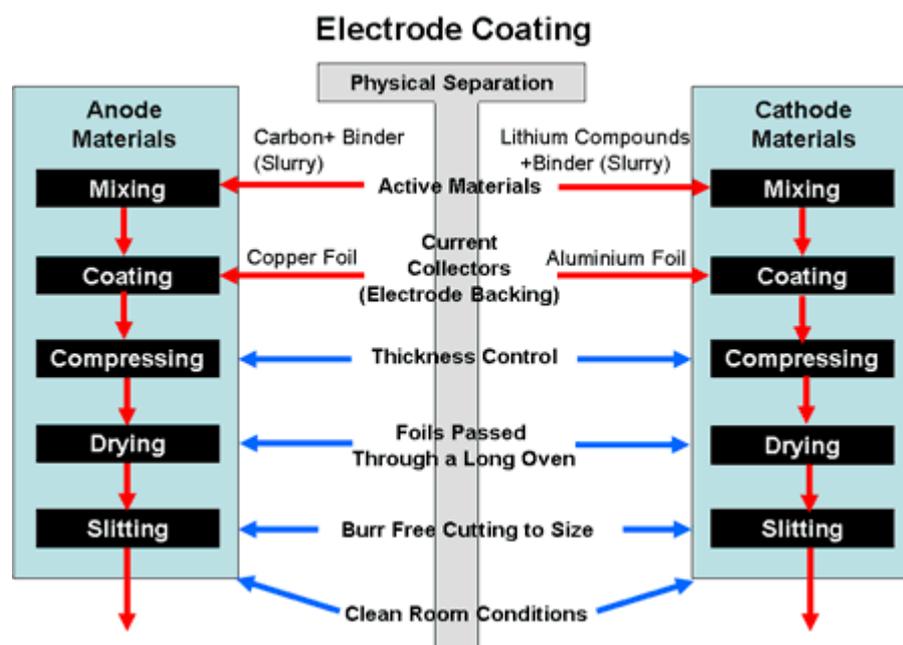


Figure 3 : Schéma procédé de constitution des électrodes (cathode et anode) [12]

- **Production des électrolytes**

Il s'agit, au cours de cette étape, de mélanger un sel (qui apportera la conductivité requise) dans un solvant ou un mélange de solvants aux propriétés adaptées. Le sel le plus couramment utilisé est le LiPF_6 . Les solvants les plus utilisés sont des carbonates organiques et l'éthyle acétate. L'électrolyte est parfois acheté tout préparé avec une concentration donnée en sel par le fabricant de cellules.

Des additifs sont en général ajoutés à l'électrolyte afin d'optimiser ses différentes caractéristiques, y compris de sécurité. Il faut noter que ces additifs peuvent représenter jusqu'à quelques % en masse. Leur composition est un secret de fabrication souvent jalousement gardé et elle reste inaccessible aux utilisateurs.

4.2 FABRICATION DES CELLULES

Le procédé de fabrication des cellules est légèrement différent selon la forme finale de celle-ci (cylindrique, prismatique, coffee-bag). La figure 4 illustre les principales étapes de procédés des cellules prismatiques et cylindriques, consistant en empilement (respectivement enroulement) des éléments constitutifs des cathodes, des séparateurs, et des anodes. Les opérations comprennent successivement :

- la fabrication des électrodes,
- la mise en place des collecteurs de courants,
- l'encapsulage du dispositif de stockage d'énergie ainsi préassemblé dans une enveloppe,
- l'ajout de divers connecteurs, d'équipements électroniques, de dispositifs de sécurité (évent...),
- le thermosoudage ou soudage,
- le séchage / cuisson en salle sèche,
- le remplissage (souvent sous vide) de l'électrolyte,
- le formage de la cellule (cyclage électrique initial rendant la batterie fabriquée électriquement opérationnelle),
- le contrôle de fabrication,
- le stockage / expédition.

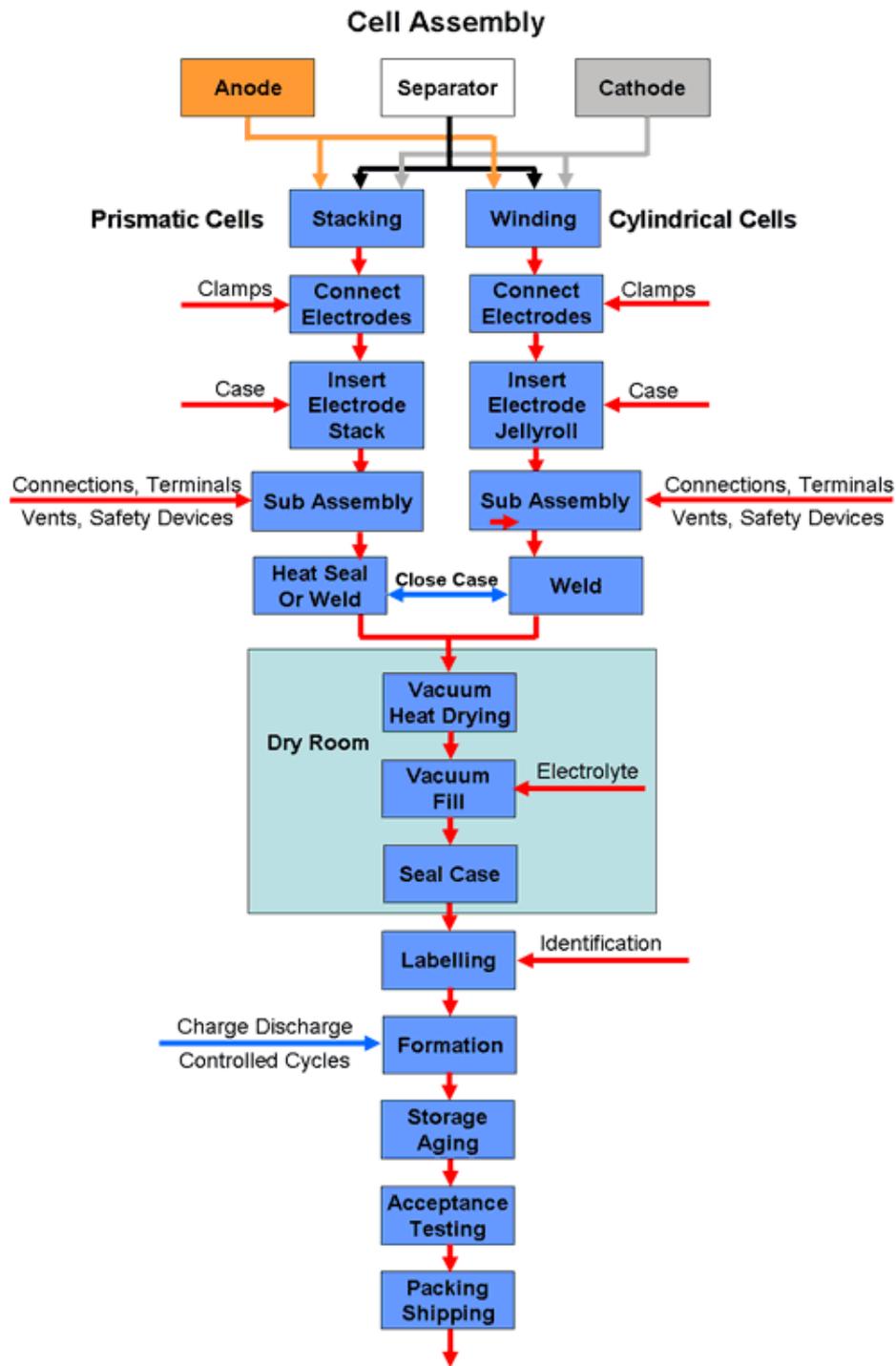


Figure 4 : Schéma procédé de fabrication d'un élément complet de batterie (cellule) [12]

Les cellules sont regroupées par modules qui sont eux-mêmes regroupés pour constituer les packs batteries. Aux différents stades d'intégration, des dispositifs (actifs et passifs) spécifiques contribuant à la sécurité de l'ensemble sont ajoutés. Le Battery Management System (BMS) peut être entièrement intégré à ce stade dans le pack batterie.

4.3 UTILISATION

Au cours de son cycle de vie, entre l'achat et la fin d'usage, le VE passe par différents cycles « normaux » tels que le roulage, le stationnement, la charge, l'entretien préventif et/ou curatif... mais peut également emprunter des voies particulières liées à l'occurrence d'événements non souhaités, du type accident, contact prolongé avec de l'eau, etc...

Chacune de ces étapes va concerner de nombreux intervenants différents : concessionnaires, réparateurs, dépanneurs, services d'urgences, services de police, particuliers, etc...

A cet égard, l'utilisation génère des problématiques communes avec celles du véhicule conventionnel, par exemple celle du transit ou du stationnement dans des espaces confinés dont le traitement mérite une analyse spécifique (tunnels, parkings, transports multimodaux...).

En revanche, en ce qui concerne les phases d'intervention dans les situations post-accidentelles (crash suivi ou non d'un incendie, incendie spontanée du véhicule, contact accidentel avec l'eau...), le profil de risques particulier présenté par le VE est susceptible d'engendrer de nouvelles situations dangereuses, notamment du fait de la présence du risque électrique. Nous décrivons ci-dessous ces situations.

- **Intervention / Service secours**

Les catégories d'intervention ainsi que les divers scénarios possibles associés ont été examinés récemment par la *Fire Protection Research Foundation* (Fondation de Recherche de la NFPA) [4]. Ces situations sont illustrées sur la figure 5.

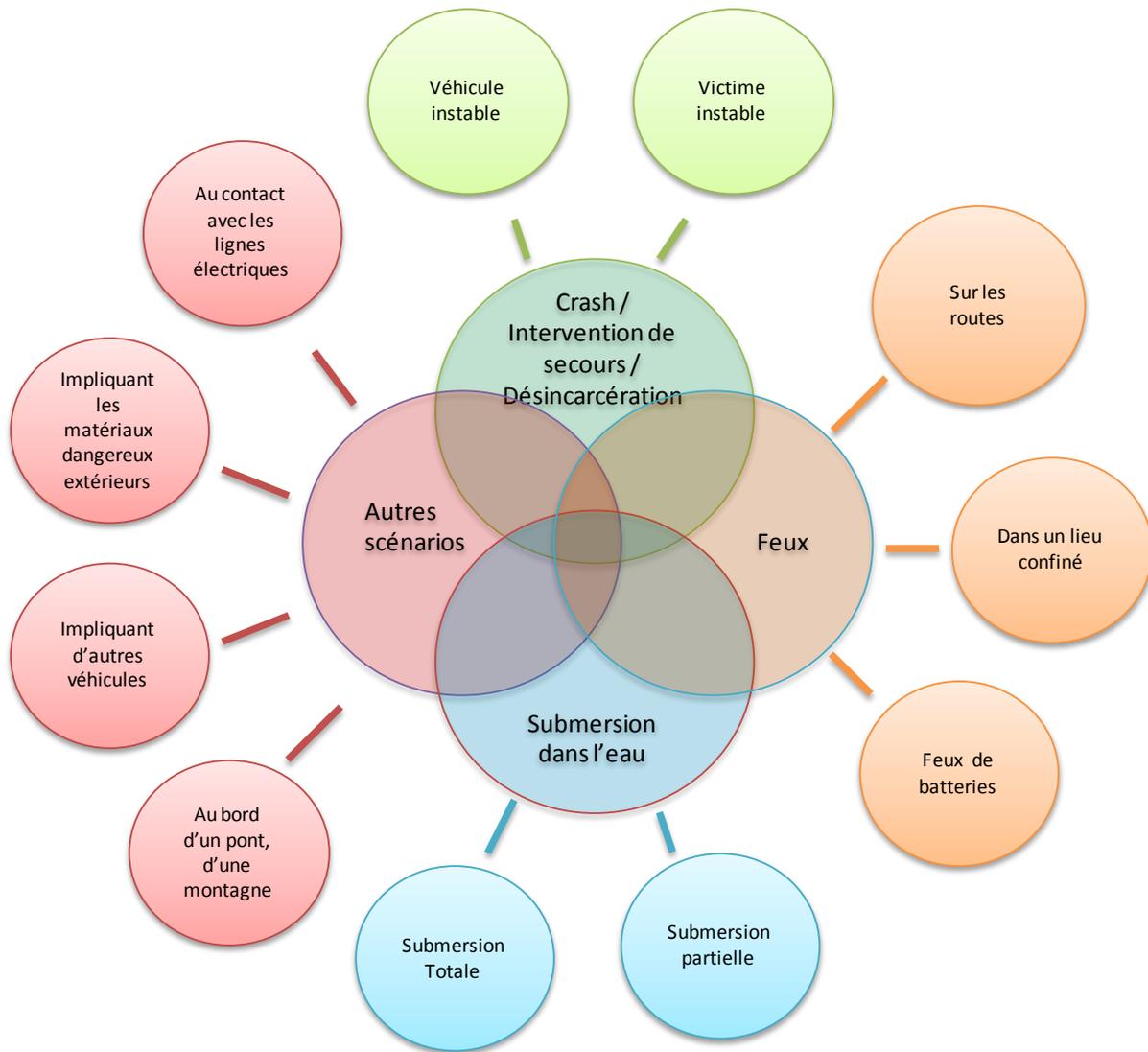


Figure 5 : Les situations d'intervention / service de secours [4]

Les services d'intervention sont entraînés pour intervenir sur ce type de scénarios pour des véhicules conventionnels. Cependant, l'extrapolation de l'expérience au VE nécessite une réflexion globale.

Cette réflexion doit intégrer à la fois la spécificité des risques (notamment électriques) présentés par ce type de véhicule mais aussi la diversité des acteurs potentiels tels que : dépanneurs, réparateurs, pompiers, SAMU, SMUR, gendarmes, douaniers, policiers, ... sans négliger la possible intervention de témoins présents sur les lieux d'un accident.

4.4 RECYCLAGE / MISE EN REBUT

Les systèmes de stockage d'énergie utilisés dans le véhicule électrique (et notamment les batteries de technologie lithium ion) sont appelés à être recyclés. Ce recyclage est encadré par deux directives, européennes, celle qui est désignée « directive batteries » (2006/66/EC) ainsi que celle qui est relative au véhicule hors d'usage (dite « directive VHU », 2000/53/EC). Le recyclage des batteries est aussi impacté par la directive européenne « WEEE » (2002/96/EC) traitant de la fin de vie des matériels électroniques et électrotechniques contenant souvent des piles et accumulateurs. Ce contexte réglementaire a des conséquences importantes :

- Le recyclage des batteries mises sur le marché de l'e-mobilité est de fait indispensable, puisque les obligations en matière de taux de recyclabilité des matériaux constitutifs d'un véhicule automobile sont de 95% à l'horizon 2015 (alors qu'un pack batteries (200 – 250 kg) pour VE de type berline dépassera sans doute 20% du poids total du véhicule).
- La directive batteries qui décrit les obligations en matière de mise sur le marché des batteries concerne tous les marchés et pas seulement celui des applications portables. Elle impose notamment des taux de collecte et de recyclage obligatoire.

Un autre aspect de la réflexion sur le recyclage est la possibilité que la batterie équipant un VE ait une seconde vie pour des applications stationnaires moins exigeantes en termes de performances (systèmes de sauvegarde de moyens de télécommunication, systèmes de régulation de la charge réseau,...).

Nous avons indiqué la vision (septembre 2009) du cabinet d'études technico-économiques *Frost & Sullivan* sur cette seconde vie (Figure 6) en devenir des batteries.

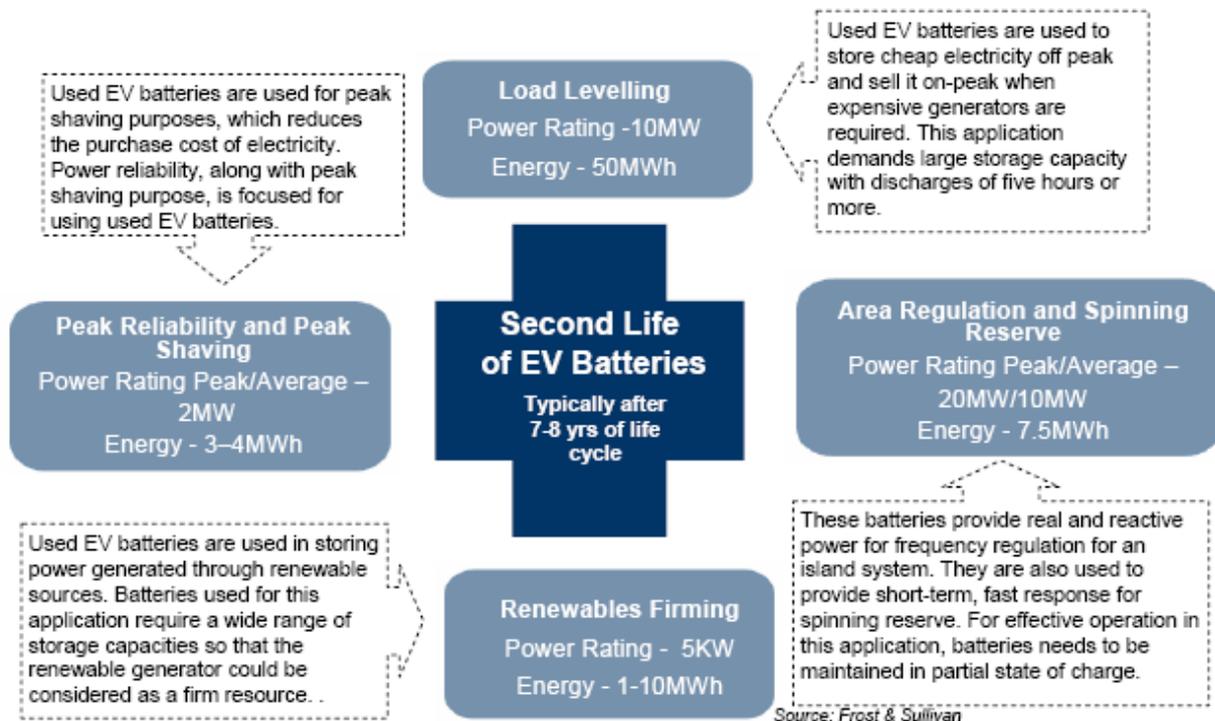


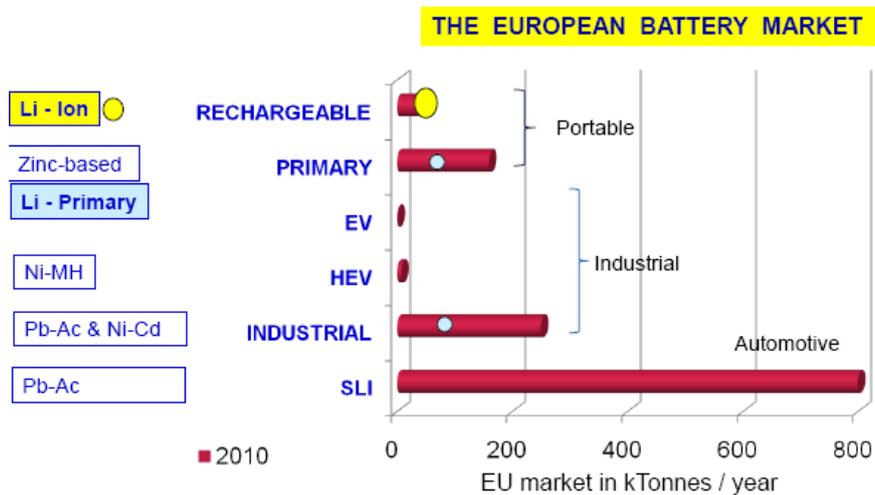
Figure 6 : Voies d'utilisation en seconde vie des batteries conçues pour l'e-mobilité (source : Frost & Sullivan, 2009 [13]).

La présente étude s'est principalement intéressée au recyclage des batteries, principal élément nouveau par rapport aux filières de recyclage de composants de véhicules traditionnels.

La figure 7 ci-dessous présente une vision prospective présentant la place des batteries au lithium dans le futur marché des batteries. Elle montre l'impact de l'arrivée massive du VE sur le marché. Actuellement marginale, l'activité de recyclage de batteries au Lithium va devoir rapidement s'adapter à cette croissance des volumes.

Aujourd'hui, il n'y a pas de vision unique sur les méthodes de recyclage des batteries rechargeables au lithium. Les procédés actuels divergent d'un acteur à l'autre et devront être adaptés aux batteries de puissance. La figure 8 présente le procédé mis en œuvre par la société Umicore pour ses filières Li-ion, NiMH et NiCd.

La France fait partie des pays ayant anticipé l'accroissement du marché du recyclage des batteries. A cet effet des investissements lourds ont récemment été réalisés par plusieurs acteurs.



1 EU 2010 { 0.25 million HEV - 30 kg battery - 7.5 kT (Ni-MH)

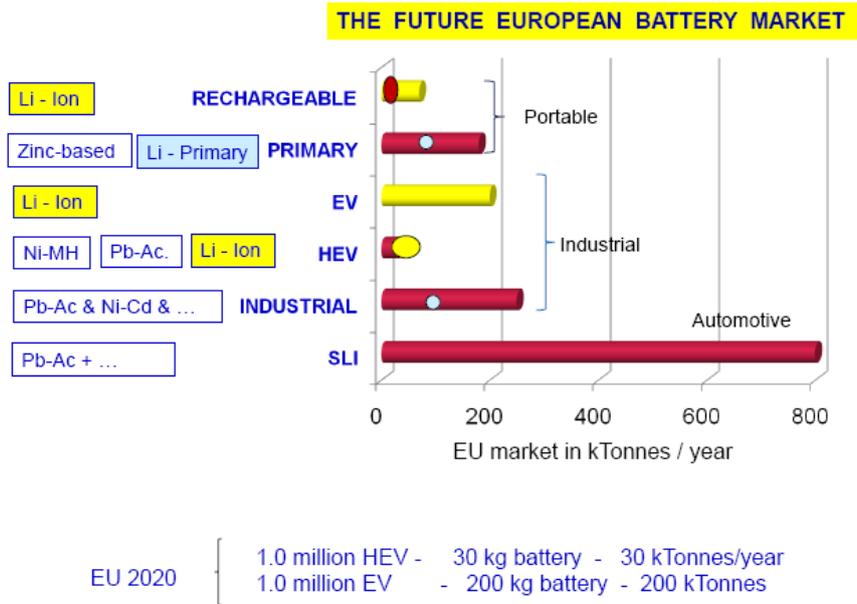


Figure 7: Marché des batteries par secteur d'utilisation (état 2010 et projections 2020) (source Recharge sept 2010) [14]

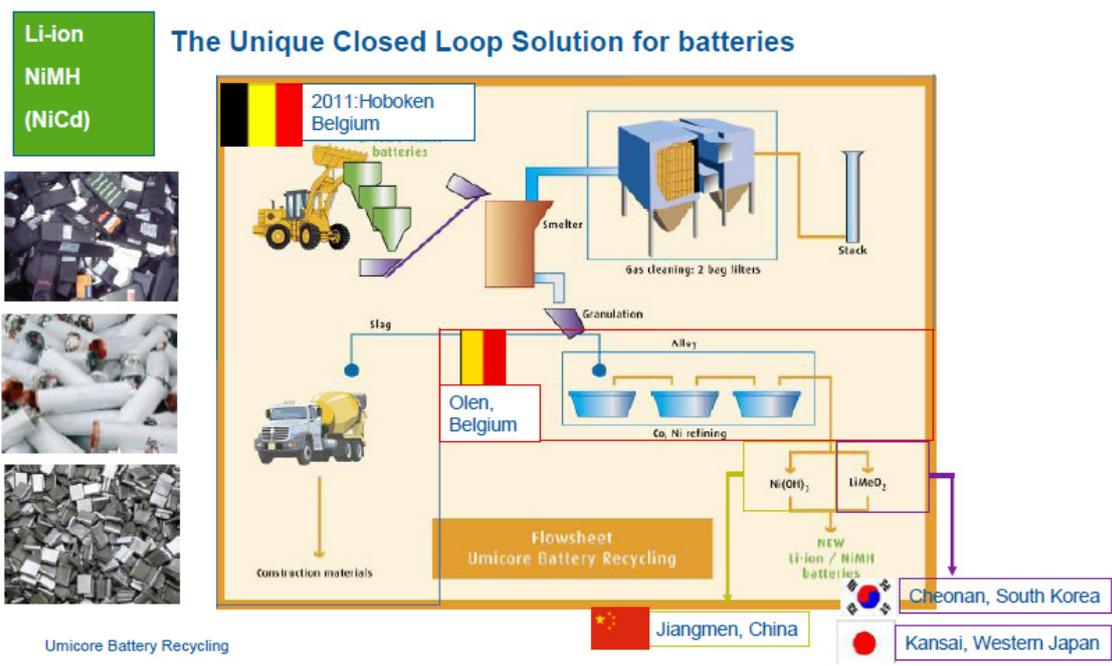


Figure 8 : Procédé de recyclage commun aux filières Li-ion, NiMH et NiCd expérimenté par Umicore [15]

5. ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES

Le principal objectif de cette analyse préliminaire des risques est d'identifier, et dans la mesure du possible, d'évaluer les principaux risques associés au déploiement du véhicule électrique en France, tout au long de son cycle de vie. Nous nous sommes volontairement limités dans cette étude aux risques spécifiques provenant de l'introduction du véhicule électrique par rapport au véhicule thermique.

Dans un premier temps, nous avons spécifiquement décrit et analysé les trois différentes typologies de risques propres au véhicule électrique : électriques, chimiques et mécaniques.

Nous avons ensuite passé en revue les différentes étapes du cycle de vie du véhicule électrique en identifiant les principaux risques susceptibles de survenir au cours de celles-ci.

Nous avons également essayé de fournir au cours de cette APR les principales mesures qui nous paraissaient pertinentes pour prévenir l'occurrence de ces risques aussi bien au niveau technique, que normatif ou réglementaire. Ces recommandations s'adressent à tous les acteurs susceptibles d'intervenir au cours du cycle de vie, pouvoirs publics, industriels, services de secours...

Les résultats de cette APR sont synthétisés dans l'annexe 1.

5.1 TYPOLOGIES DES RISQUES LIES AUX BATTERIES

5.1.1 Risques électriques

Les phénomènes dangereux liés à l'électricité à prendre en compte sont les suivants :

- production d'arc électrique, d'étincelles,
- feux électriques (ex : feux de faisceaux de câbles...),
- chocs électriques,
- production d'ondes électromagnétiques et perturbations associées (courants induits, dysfonctionnements d'équipements à courants faibles...).

Les principales causes de ces phénomènes dangereux sont :

- perte d'isolation électrique,
- courts-circuits (internes, externes),
- courant électrique excessif (surintensité),
- surcharge,
- surdécharge,
- défaillance des équipements (défaut d'isolement...).

- **Arc électrique, étincelle**

Un arc électrique (ou étincelle) est une décharge électrique ou un courant électrique visible dans l'air. L'arc électrique se crée par ionisation du gaz. Les ions du gaz créés entraînent le reste de la charge présente sur la surface. Ainsi, le courant s'établit à travers du gaz, supposé être un milieu isolant.

Le courant traversant un arc électrique est généralement intense et variable. C'est pourquoi un arc électrique peut causer de fortes perturbations électromagnétiques pouvant endommager les équipements électroniques à proximité.

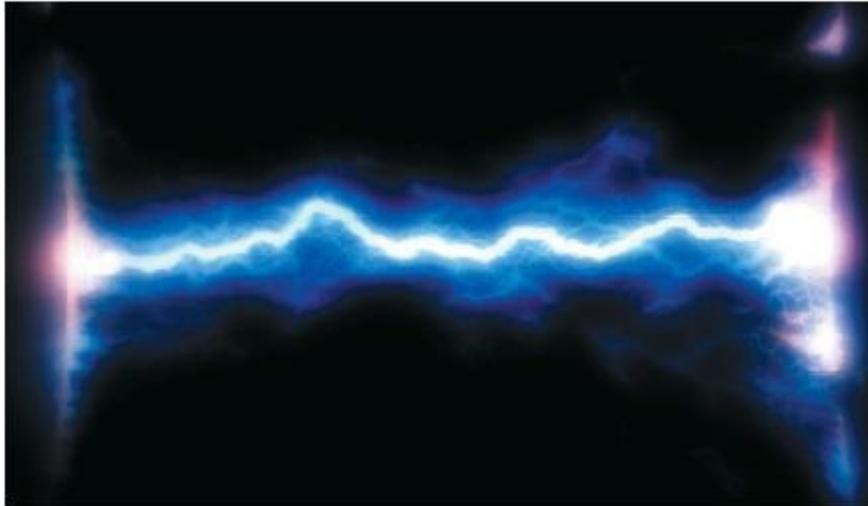


Figure 9 : Photo d'un arc électrique

La température d'un arc peut atteindre jusqu'à 15 000 – 35 000 °C et sa chaleur peut provoquer la combustion de vêtements à une distance de 3 m.

Il est extrêmement difficile de prédire et donc de prévenir l'apparition d'un arc électrique, qui peut survenir dans toutes les situations où une tension électrique existe. Sa formation dépend de nombreux paramètres, tels que :

- *La tension et puissance électrique* : la probabilité d'apparition d'un arc augmente avec la tension électrique. Cependant, il n'existe pas de tension minimale en-dessous de laquelle un arc ne pourrait pas se former.
- *La distance entre la source électrique et la cible* : la probabilité d'apparition d'un arc augmente lorsque cette distance diminue.
- *L'humidité* : la probabilité d'apparition d'un arc augmente lorsque l'humidité est importante.
- *La forme physique et la nature chimique des matières constituant la source électrique et la cible* : les formes pointues et les matériaux ayant une bonne conductibilité électrique favorisent l'apparition d'un arc électrique.
- *La nature et la concentration chimique du gaz* : une concentration élevée en gaz polaires augmente la probabilité d'apparition d'un arc électrique.

Les conséquences d'un arc électrique sont nombreuses et potentiellement catastrophiques. Un arc électrique peut ainsi générer ou provoquer :

- des brûlures, des éblouissements,
- des feux ou explosions en servant de source d'inflammation,
- des chocs électriques potentiellement létaux,
- des courts-circuits ou surcharges de l'alimentation électrique dus au très fort courant électrique de l'arc,
- des dommages mécaniques comme la destruction des structures dues aux impacts importants (chaleur, flux de matières),
- la perturbation et/ou l'endommagement d'équipements électroniques en raison des ondes électromagnétiques,
- des arcs électriques (s'ils se prolongent) pouvant aussi être à l'origine de départ de feux.

- **Feux électriques**

Les feux électriques sont susceptibles de provenir de la chaleur dégagée lors du passage d'un courant électrique à travers une résistance, faisant fondre ou brûler les métaux et objets combustibles situés à proximité.

Ce phénomène peut apparaître suite à la formation d'un court-circuit ou d'un arc électrique provenant de défauts d'isolation électrique. Les feux électriques peuvent se produire pour n'importe quelle tension électrique, même très basse. Leur ampleur dépend du courant, de la tension et de la durée, donc de la capacité ou énergie électrique W de la source électrique. Cette énergie électrique W mesuré en Wh est exprimée dans l'équation suivante :

$$W = \Delta V \times I \times t$$

Où : $\Delta V = U$ est la différence de tension électrique aux bornes de l'appareil ou entre les deux points de contacts (V)

I est le courant électrique (A)

t est la durée ou le temps (h)

Ainsi, les conséquences potentielles des feux électriques sont proportionnelles aux capacités totales et aux tensions électriques des batteries des véhicules électriques et du réseau électrique.

Les conséquences des feux électriques sont très variées :

- des brûlures,
- des incendies,
- des dommages mécaniques comme la destruction des structures dues aux effets thermiques des feux électriques
- la perturbation et/ou l'endommagement d'équipements électroniques en raison des ondes électromagnétiques.

Sauf cas particulier (source d'énergie coupée...) les feux électriques ne s'attaquent pas avec de l'eau. L'eau déversée provoque en effet de nouveaux courts-circuits ce qui génère également des risques de chocs électriques pour les intervenants et pour les occupants d'un véhicule en situation de détresse en cas de feu post crash. **L'intervention en cas d'incendie sur véhicule électrique nécessitera donc des protocoles d'intervention adaptés.**

- **Chocs électriques**

Un choc électrique se produit lorsqu'un courant électrique traverse le corps humain. Outre le danger lié à la tension électrique, le courant électrique est également un paramètre clé de la mesure du danger du choc électrique. Un choc électrique causé par une tension importante, mais avec un courant faible peut être moins dangereux que celui causé par une tension plus faible mais avec un courant plus important [4]. C'est en effet l'intensité du courant qui conditionne les dommages, réversibles ou non, causés sur un être humain.

Ces deux paramètres sont reliés entre eux par la relation $I = U/R = \Delta V/R$ (avec : $U = \Delta V$ étant le potentiel électrique et R la résistance). La résistance R va varier selon les personnes, les habits (gants, chaussures, etc...) ainsi que l'humidité de l'environnement ou le degré d'hydratation de la personne.

Le Tableau 1 représente les effets de différents niveaux de courant alternatif¹ sur l'homme.

Courant électrique (mA)	Effets
1	Sensations de picotements
2	Choc léger, mais pas de douleur, pas de perte de contrôle des muscles
5 - 9	Choc avec douleur, mais pas de perte de contrôle des muscles
16	Choc sévère (perte de contrôle des muscles, difficulté de respiration, seuil de début de « laisser aller » (let-go))
20	Paralyse des muscles de respiration
30	Etouffement possible
100	Arrêt cardiaque (seuil de fibrillation ventriculaire) pour 3 secondes de choc
200	Arrêt cardiaque (seuil de fibrillation ventriculaire) pour 1 seconde de choc
300	Arrêt de respiration
900	Brûlure sévère
1500	Brûlure des organes internes

Tableau 1 : Effets du courant alternatif (AC) sur l'homme [4],[16],[17]

¹ Les niveaux d'effets du courant continu sont légèrement supérieurs à ceux du courant alternatif. Par exemple, le seuil de fibrillation cardiaque est de 130 mA en courant continu alors qu'il est donné à 100 mA, voire à 75 mA, en courant alternatif. Par contre, le courant continu occasionne des brûlures plus profondes ainsi qu'un phénomène d'électrolyse.

Dans les véhicules électriques, le risque de choc électrique se présente dans toutes les situations où il existe un risque de perte d'isolation électrique au niveau des batteries, des circuits électriques à l'intérieur des véhicules, du moteur électrique, du chargeur, du réseau électrique de recharge,... De plus, des déformations consécutives à un crash, ou les conséquences d'une intervention avec de l'eau peuvent occasionner d'autres causes de chocs électriques (courts-circuits...).

- **Champs électriques – champs magnétiques – Ondes électromagnétiques**

Le but de ce paragraphe n'est pas de traiter techniquement ces questions mais d'introduire les deux scénarios 33 et 34 relatifs aux perturbations que pourrait subir le véhicule et notamment ses équipements de sécurité (BMS) ainsi qu'aux risques sanitaires sur les utilisateurs et le public. Le lecteur pourra se reporter aux documents INRS consacrés à ces sujets ².

On considère généralement en régime statique que le champ électrique est créé par des charges au repos tandis que le champ magnétique est créé par des charges en mouvement (courants électriques).

L'onde électromagnétique est un modèle utilisé pour représenter le rayonnement électromagnétique ou le champ électromagnétique qui se compose d'un champ électrique et d'un champ magnétique que l'on peut mesurer indépendamment. Néanmoins ces deux entités sont indissociables.

Une onde électromagnétique peut être caractérisée par sa fréquence (le nombre de variations du champ par seconde exprimé en hertz (Hz)) ou par sa longueur d'onde (en m), ces deux valeurs étant inversement proportionnelles. Un classement des différents types d'onde en fonction de leur longueur d'onde est présenté sur la figure 10.

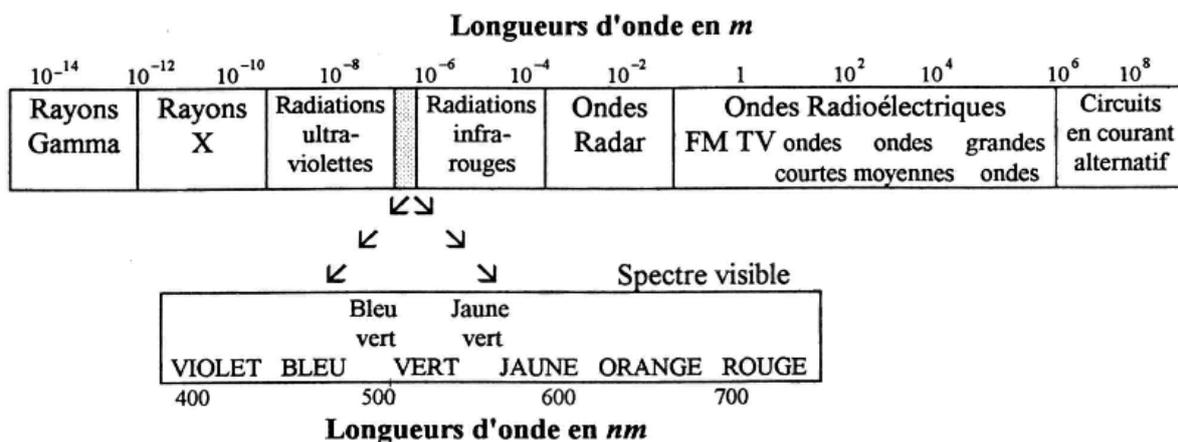


Figure 10 : Différents types d'ondes électromagnétiques [18]

² Champs électromagnétiques - ED 4201 Généralités sur les rayonnements non ionisants jusqu'à 300 GHz ; ED 4203 Les effets des rayonnements non ionisants sur l'homme et ED 4215 : les mécanismes d'interaction avec le corps humain

La propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux physiques augmente lorsque la longueur d'onde diminue. Le phénomène de propagation devient donc négligeable lorsque la longueur d'onde est de l'ordre de grandeur du circuit électrique en courant alternatif.

Des risques liés aux ondes électromagnétiques provoqués par certains équipements émetteurs d'ondes (téléphones portables, antennes-relais...) sur la santé n'ont pas encore été identifiés mais restent largement débattus. La relation entre la dose et les effets est notamment très mal comprise. Quelle que soit la réalité du risque, les ondes électromagnétiques représentent en tous cas aujourd'hui un vrai sujet pour les technologies suspectées d'en émettre.

Les ondes électromagnétiques sont également de nature à perturber et endommager d'autres équipements électroniques ou supports magnétiques à proximité. Il est donc indispensable d'évaluer les risques d'incompatibilité électromagnétique potentiels entre les différents équipements électroniques du véhicule, notamment les organes participant à la gestion de la sécurité et les infrastructures environnantes (bornes de charges, réseau électrique...).

Il faut noter que les risques liés aux ondes électromagnétiques augmentent avec le courant, la tension et la puissance électriques impliqués.

Comme détaillé dans le rapport sur la réglementation [10], le règlement R10 concerne l'homologation des véhicules pour la compatibilité électromagnétique. Il traite notamment de l'immunité aux perturbations rayonnées des véhicules et de leurs équipements. Cependant, seules sont concernées les fonctions liées à la sécurité, c'est-à-dire la commande directe du véhicule, la protection du conducteur, des passagers et des autres usagers de la route. Le règlement R10 doit être adapté, dans un texte actuellement à l'étude, à la situation où le véhicule est en charge sur le secteur au moyen d'un chargeur embarqué.

Il apparaît donc nécessaire de s'assurer que tous les risques potentiels soient qualifiés au cours d'études spécifiques. Il sera notamment judicieux de réaliser des tests de compatibilité électromagnétique entre ces différents équipements ainsi que de mener une réflexion sur l'applicabilité des directives 1999/519/CE (limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz)) et 2004/40/CE (Prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques)).

5.1.2 Risques mécaniques

Les véhicules électriques présentent des propriétés mécaniques similaires aux véhicules classiques. Cependant, l'introduction de nouveaux équipements et éléments est de nature à potentiellement modifier certaines de leurs caractéristiques. Les différences peuvent notamment se trouver aux endroits où les nouveaux équipements sont introduits et où les masses (ou répartition de masses) sont significativement modifiées : pack batteries, moteur électrique, convertisseurs...

Les risques mécaniques concernent tous les dangers liés aux mouvements, équilibres, pressions et résistances des objets ou équipements. Les principaux risques sont détaillés ci-dessous.

- **Stabilité, centre de gravité**

La stabilité dynamique du véhicule peut être potentiellement affectée par le déplacement du centre de gravité (par rapport au véhicule thermique) avec l'introduction d'un pack batteries très lourd. La masse d'un pack batterie pourra en effet atteindre des masses de l'ordre de 200 à 250 kg.

Si cette nouvelle inertie véhicule n'est pas parfaitement traitée pour les différentes situations de roulage, les risques de renversement ou de crash augmentent. Certains événements peuvent modifier cette inertie en cours de vie du VE :

- Le changement du premier pack de batteries en fin de vie de celui-ci : la durée de vie d'un véhicule électrique pourra être plus longue que celle des batteries. Avec le progrès rapide de développement des batteries, les nouvelles générations sont susceptibles d'être plus légères que les premières générations. Ce changement significatif de poids des batteries pourra affecter l'équilibre du véhicule électrique.
- Le changement volontaire et plus précoce dans l'optique d'une recherche de meilleures performances : il est probable que certains clients souhaiteront équiper leur véhicule avec des batteries plus performantes, différentes de celles initialement présentes. Ces changements seront de nature à provoquer un déplacement du centre de gravité du véhicule et donc de modifier sa stabilité. Le cadre réglementaire (homologation du VE) devrait cependant constituer un garde-fou contre cette pratique. Par ailleurs, le poids élevé des batteries ne facilite pas la réalisation de cette opération par des particuliers.

- **Résistances mécaniques**

La résistance mécanique des matériaux exprime leur capacité à supporter les contraintes et agressions mécaniques externes. Les défaillances des résistances mécaniques des matériaux peuvent notamment conduire :

- à des déformations, ruptures, perforations des structures mécaniques constituant le pack batteries par exemple,
- à des effets « missiles » des objets lourds. Ainsi le pack batteries peut-il subir un effet « missile » lors d'une collision ou d'un crash conduisant à une perforation de l'habitacle, en cas de résistance mécanique insuffisante ou d'emplacement inadéquat à l'intérieur du véhicule,
- à des pertes d'isolation électrique des lignes électriques,
- à des pertes de confinement des conduites, des réservoirs, des équipements ou des batteries contenant des produits inflammables, toxiques et corrosifs.

Ces défaillances de résistances mécaniques peuvent notamment se manifester lors de chocs, de collisions, de vibrations, dues à un sous-dimensionnement des équipements ou de leurs dispositifs de fixation. Les risques liés à cette phase sont décrits dans le § 5.4.1.

- **Comportement dynamique du véhicule**

Le changement important en termes de répartition des masses embarquées dans un VE peut être à l'origine d'une modification du comportement dynamique du véhicule (défaillances de pièces mécaniques, ...) par rapport au véhicule thermique classique.

Ces situations sont examinées par les constructeurs qui ne bénéficient pas d'un recul important sur ces technologies.

Il convient de signaler cependant que l'expérience accumulée jusqu'ici par les gestionnaires de flottes captives (CUB et La Poste par exemple) ne semble pas consolider un caractère plus accidentogène du VE par rapport au véhicule thermique.

- **Vibrations et bruits**

Les véhicules électriques présentent une grande différence par rapport aux véhicules conventionnels au niveau de leur spectre vibratoire et sonore en particulier. Ils sont beaucoup plus silencieux à basse vitesse par l'utilisation du moteur électrique et peuvent même être pratiquement inaudibles à basse vitesse (< 30 km/h environ). Au-delà, le bruit de fond est dominé par les frottements aérodynamiques des pneumatiques sur le revêtement.

Les avantages et inconvénients issus de cette caractéristique sont nombreux (confort pour les riverains et utilisateurs, dangers pour les piétons et cyclistes...). Les principaux risques surviennent à basse vitesse, lorsque des piétons sont susceptibles de traverser une rue, du fait de l'absence de bruit signalant l'arrivée d'un véhicule.

Il faut souligner que ce sujet est déjà largement traité et que des normes et bonnes pratiques seront a priori rapidement mises en place.

5.1.3 Risques liés aux stockages des carburants (essence ou diesel)

Les véhicules électriques hybrides mettront en œuvre des carburants classiques. Les risques liés aux hydrocarbures sont bien connus et similaires à ceux des véhicules conventionnels fonctionnant avec le moteur à combustion interne. Il faut évidemment s'assurer au cours des étapes de conception que les circuits électriques ou batteries ne puissent pas être à l'origine de l'inflammation d'éventuelles vapeurs d'hydrocarbures, notamment au cours des phases de remplissage du réservoir.

Il faut souligner que dans le cas des véhicules tout électriques, un réservoir d'hydrocarbures de quelques litres pourrait subsister sous le capot moteur afin d'alimenter, de manière autonome, le système de chauffage / climatisation. Cette situation, qui existait déjà pour la génération des VE Cd/Ni, a été confirmée par plusieurs interlocuteurs.

5.1.4 Risques chimiques

Les principaux risques chimiques propres aux véhicules électriques proviennent des batteries.

5.1.4.1 Risques liés aux batteries Li-ion et LiPo

Les batteries Li-ion combinent la mise en œuvre d'électrodes fortement oxydantes et réductrices en contact avec un électrolyte organique inflammable. Les électrodes, notamment l'électrode positive, peuvent devenir instables à des températures élevées (> 200°C). De plus, les solvants composant l'électrolyte possèdent des pressions de vapeurs relativement importantes à des températures modérées.

Des conditions inhabituelles et/ou abusives d'utilisation (surcharge, court-circuit, présence d'une source de chaleur extérieure ...) peuvent donc provoquer des augmentations brutales de température pouvant conduire à des feux, explosions ou dégagements de produits toxiques.

La température à l'intérieur d'une cellule est déterminée par l'équilibre entre la chaleur générée et celle dissipée par celle-ci. Lorsqu'une cellule atteint une certaine température (en général de l'ordre de 130 à 150°C), des réactions chimiques exothermiques se produisent entre les électrodes et l'électrolyte, ce qui contribue à augmenter d'autant plus la température. Si la chaleur produite ne peut pas être dissipée suffisamment par la cellule, les réactions s'accroissent alors, provoquant une augmentation rapide de la température, pouvant conduire **au phénomène d'emballement thermique**. Les batteries ont une faible capacité à dissiper la chaleur et sont donc fortement sujettes à l'emballement thermique.

La pression générée par la vaporisation de l'électrolyte peut ensuite conduire à des défaillances mécaniques à l'intérieur de la cellule pouvant provoquer la rupture de son enveloppe extérieure.

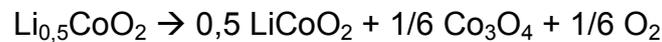
Cette perte de confinement est alors à l'origine de fuites de l'électrolyte, produit toxique, inflammable et corrosif, sous forme liquide mais également gazeux. Les vapeurs ainsi générées et mélangées avec l'air peuvent alors former une atmosphère explosive (ATEX). Celle-ci est susceptible de s'enflammer au contact d'une source d'inflammation du type étincelle ou surface chaude, souvent présentes à l'intérieur d'un véhicule. Il en résulte alors une explosion provoquant des effets thermiques et des effets de pression.

De plus, les sels d'électrolyte tels que l'hexafluorophosphate de lithium LiPF_6 , le tétrafluoborate de lithium LiBF_4 , le perchlorate de lithium LiClO_4 , l'hexafluoroarsenate de lithium LiAsF_6 peuvent dégager des fumées particulièrement toxiques et corrosives contenant du phosphore, du fluor et du lithium. Des essais réalisés à l'INERIS [19] ont ainsi montré la formation d'acide fluorhydrique (HF) lors de la dégradation thermique de batteries Li-ion.

Le mécanisme réactionnel conduisant à l'emballement thermique [20] peut être résumé ainsi :

- 1) Décomposition chimique de la couche de Passivation (SEI)³,
- 2) Réaction chimique entre l'anode et l'électrolyte,
- 3) Réaction chimique entre la cathode et l'électrolyte,
- 4) Fusion du séparateur conduisant à un court-circuit,
- 5) Décomposition thermique de l'électrolyte,
- 6) Décomposition thermique de la cathode,
- 7) Oxydation de l'anode et d'autres composants de la batterie.

De plus, certaines cathodes métalliques peuvent conduire au dégagement d'oxygène à haute température [21] - [23], susceptible de provoquer à son tour une réaction de combustion avec l'électrolyte, générant de la chaleur, selon la réaction suivante [24] :



L'emballement thermique est souvent provoqué par des conditions abusives d'utilisation, d'origine thermique (surchauffe, feu...), électrique (court-circuit, surcharge, ...) ou mécanique (écrasement, court-circuit interne ou externe...). Les différents processus (voir figures 11, 12, 13) conduisant aux emballements thermiques en cas de surcharge, de chauffage externe et de court-circuit interne sont présentés ci-dessous pour des batteries LiCoO₂/graphite [25].

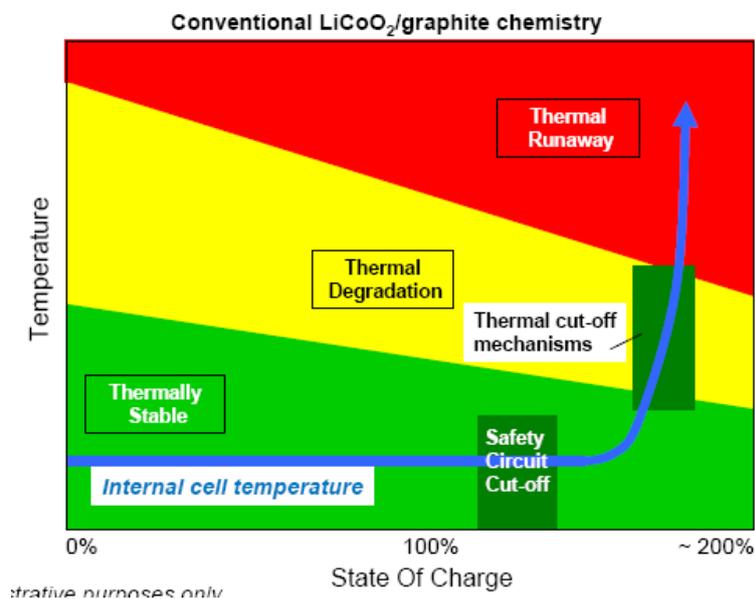


Figure 11 : Surcharge et processus d'emballement thermique [25].

³ La SEI (Solid Electrolyte Interface) correspond à une couche de passivation qui se forme au cours de la 1^{ère} charge au niveau de l'électrode de graphite. La SEI est cruciale pour la stabilité de la batterie.

En cas de surcharge électrique (cf. figure 11), la transition vers un emballement thermique incontrôlable est potentiellement aggravée par le fait que la plage de stabilité en température est plus étroite. Deux mécanismes passifs ou actifs peuvent être déclenchés pour le prévenir :

- un coupe-circuit électrique en cas de surcharge électrique peut être activé par le BMS,
- des dispositifs autonomes (mais irréversibles) basés sur un changement de la perméabilité du séparateur aux ions lithium peuvent aussi être envisagés.

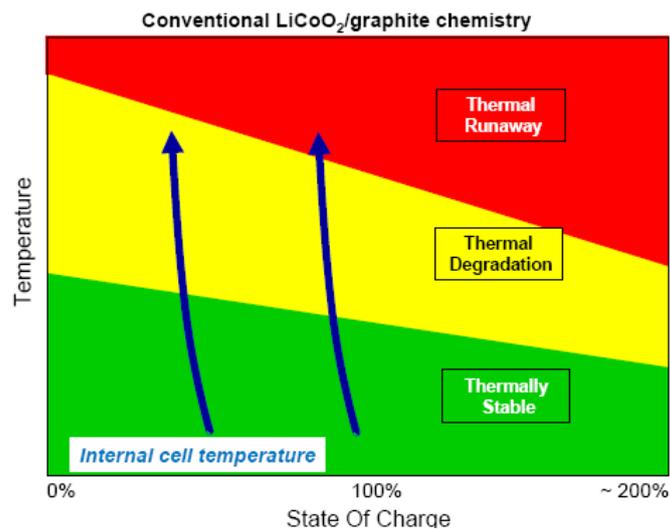


Figure 12 : Chauffage externe et processus d'emballement thermique [25].

En cas de chauffage externe (cf. figure 12), l'emballement thermique est inéluctable, quelque soit l'état de charge électrique de la batterie, si la source de chauffage externe n'est pas interrompue à temps.

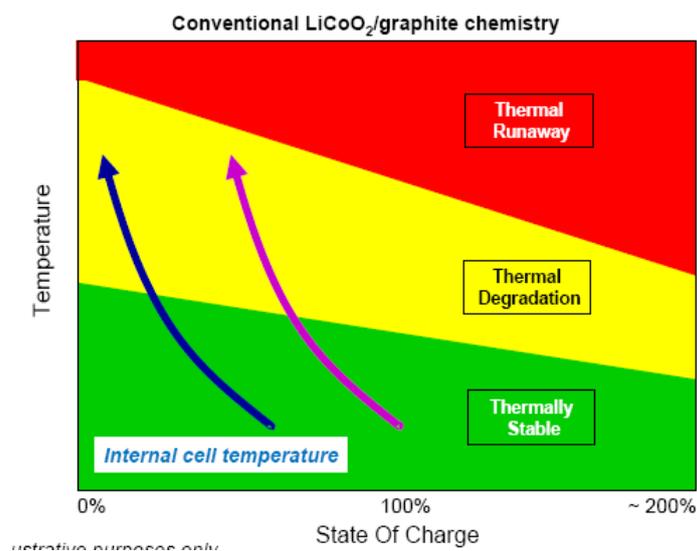


Figure 13 : Court-circuit interne et processus d'emballement thermique [25].

Le court-circuit interne diminue la tension externe de la batterie, du fait du fort courant qui s'instaure en interne. Aucune barrière de sécurité, une fois ce scénario établi ne peut fonctionner au niveau de l'élément de batterie concerné.

Réactions retardées : Il est important de souligner qu'un emballement thermique peut être un processus relativement lent et qu'il peut donc se déclencher plusieurs heures voire plusieurs jours après l'événement initiateur (surcharge, choc, court-circuit...). Il est donc particulièrement important de surveiller une batterie ayant subi un tel événement et de contrôler, si possible, l'évolution de sa température.

De manière générale, on peut constater sur la figure 14 que la zone de températures et de tensions où la batterie fonctionne en sécurité est relativement étroite. Tout fonctionnement en dehors de cette zone peut conduire à des phénomènes potentiellement dangereux.

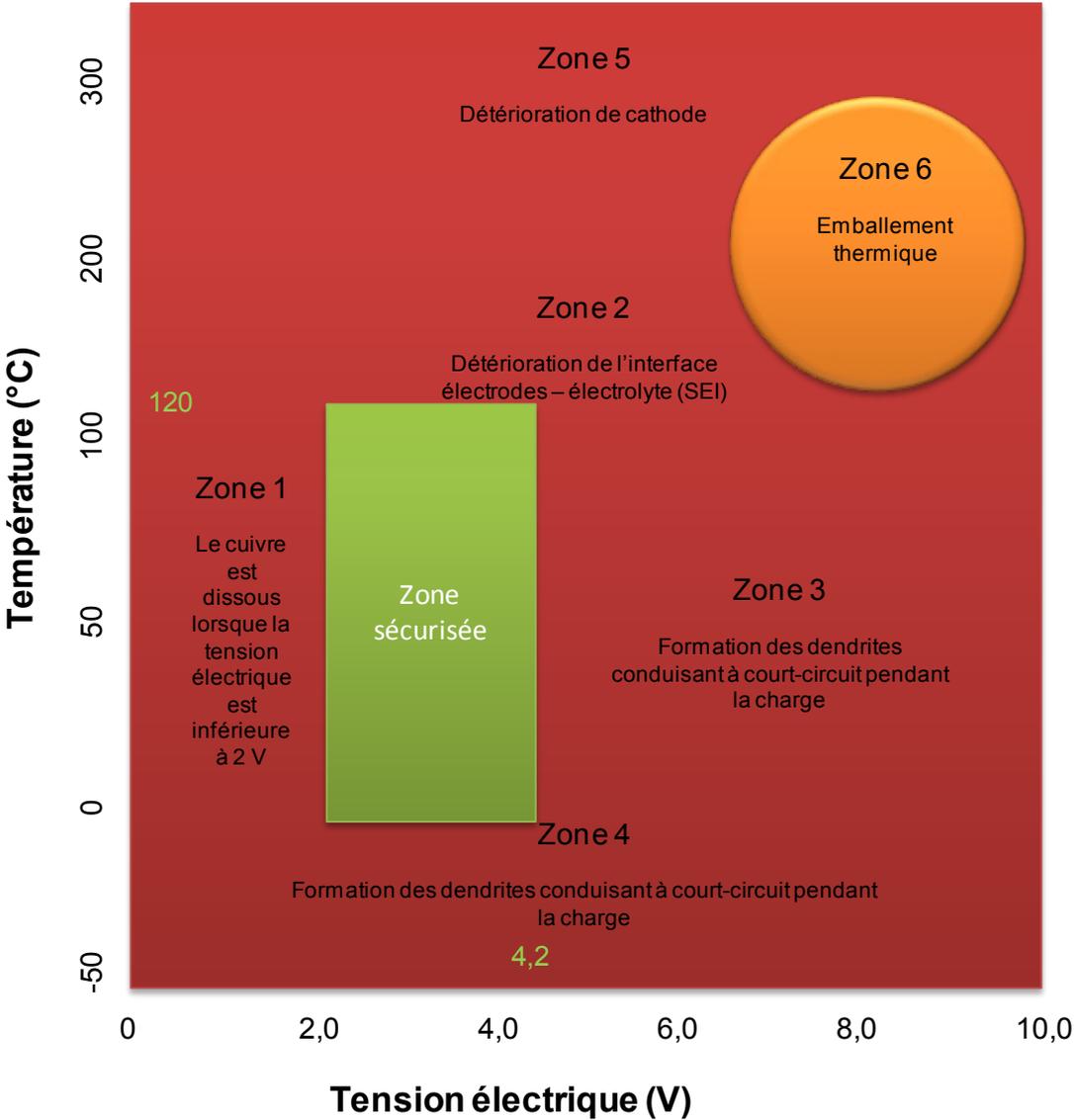


Figure 14 : Influence de température et de tension électrique sur la sécurité des batteries Li-ion [26].

5.1.4.2 Risques spécifiques liés aux batteries LMP

Les deux principales spécificités des LMP vis-à-vis de la sécurité sont la présence de lithium métal et d'un électrolyte sous forme de gel :

- Le lithium métal a la caractéristique de s'enflammer spontanément au contact de l'air. Il réagit violemment au contact de l'eau et provoque alors le dégagement de gaz inflammables, notamment de l'hydrogène. De plus, le lithium présente des dangers lorsqu'il est exposé à la chaleur ou à des flammes. Il s'enflamme à une température supérieure à 180°C.
- Comme l'électrolyte est un gel solide, les risques de fuite de liquides ou de dégagement gazeux sont beaucoup moins importants.

En contrepartie, l'état solide de l'électrolyte constitue aussi le désavantage premier des polymères utilisés car ils conduisent à une conductivité électrique réduite, compensée par l'ajout de plastifiants. Cette pratique réduit alors le bénéfice du choix du matériau initial en termes de sécurité... [Conte, 2006] [27].

Il faut noter que les cellules doivent être chauffées à plus de 60°C pour que l'électrolyte puisse conduire correctement les ions Lithium, ce qui nécessite la présence d'un système de régulation de température.

Enfin, ce type de technologie facilite la formation de dendrites, qui peuvent provoquer des courts-circuits internes.

Formation de dendrites : c'est un phénomène correspondant à la formation de « plaques » ou de « filets » de lithium sur la surface extérieure de l'anode graphite. Ces plaques de lithium peuvent se développer et atteindre la cathode pour créer un court-circuit. Lors de la décharge, ces plaques de lithium peuvent se dissoudre partiellement ou complètement, et créer des plaques de lithium « mort » dispersées dans l'électrolyte. Ce phénomène réduit la capacité des batteries et peut aussi provoquer des courts-circuits internes. La formation de dendrites s'accélère lorsque la charge est réalisée à basse température (< 0°C) ou à haute tension électrique (> 4,2 V) (voir figure 14).

5.1.4.3 Risques spécifiques liés aux batteries NiMH

Les batteries NiMH ne contiennent pas de produits toxiques ou cancérigènes. Par contre, les substances chimiques de l'électrolyte sont corrosives. Elles présentent une bonne tolérance aux opérations de charges et surcharges qui n'entraînent pas d'instabilité particulière mais qui peuvent générer de l'oxygène et de l'hydrogène, gaz très inflammable.

Les cellules sont donc équipées d'évents pour pouvoir évacuer une éventuelle surpression due à l'accumulation de ces gaz et ainsi éviter une rupture de la cellule. Les packs batteries doivent être alors correctement ventilés pour pouvoir diluer l'hydrogène ainsi dégagé et éviter la formation d'une ATEX à l'intérieur. Les packs sont également munis d'évents et il est important d'éviter la présence de source d'inflammation à proximité de leurs orifices.

Les batteries NiMH peuvent générer de la chaleur lors des surcharges ou durant certaines phases de la décharge et nécessitent donc d'être équipées de systèmes de refroidissement.

Les risques présentés par ces batteries ne sont donc pas aussi importants que ceux présentés par celles à base de Lithium, mais l'accidentologie montre cependant qu'ils ne doivent pas être négligés. Le retour d'expérience au Transport Maritime laisse penser que ces batteries sont moyennement résistantes aux températures excessives rencontrées lors des transports internationaux (niveau de température critique évalué aux alentours de 60°C).

5.1.4.4 Risques spécifiques liés aux supercapacités

L'acétonitrile C_3H_6N , souvent présent dans l'électrolyte des supercapacités, est facilement inflammable. Il est aussi irritant et nocif par inhalation. En cas d'incendie, des fumées (cyanure d'hydrogène, monoxyde de carbone, oxydes d'azote, etc.) très toxiques et irritantes peuvent être générées par des combustions et des décompositions thermiques. Il faut souligner que l'utilisation d'ACN dans l'électrolyte est interdite au Japon.

Du fait de l'absence de réactions électrochimiques, les supercapacités ne présentent pas de risque d'emballement thermique.

Les risques les plus importants sont les risques de choc électrique lors du contact avec celles-ci. Il faut cependant préciser qu'elles peuvent être complètement déchargées ce qui diminue les risques au cours des phases de stockage et de transport.

5.2 GESTION DE LA SECURITE

La sécurité des batteries Li-ion est un des points particulièrement importants sur lequel travaillent les fabricants : ils mettent en place des barrières de sécurité pour réduire et maîtriser les risques. De gros progrès ont été réalisés pour assurer la sécurité des batteries depuis quelques années, y compris dans le choix des matériaux constituant les électrodes ou les électrolytes. Le choix d'une technologie représente cependant un compromis entre performance, durabilité et sécurité, et une technologie intrinsèquement sûre n'existera cependant pas dans les prochaines années.

De plus, comme mentionné dans le rapport REX [28], la sécurité va être assurée en grande partie par les choix effectués au niveau du design du packaging des batteries et des barrières de sécurité pour prévenir les principaux événements accidentels.

Les principales barrières actives et passives actuellement utilisées sont les suivantes [3] :

- des systèmes de régulation de la température (à l'eau, à l'air...) contrôlés par l'électronique,
- des événements s'ouvrant en cas de brutale augmentation de pression,
- des fusibles thermiques qui fondent quand des courants trop importants circulent,
- des équipements permettant de limiter le courant passant à travers les cellules, du type PTC (positive thermal coefficient) par exemple,

- des séparateurs permettant de couper les réactions en cas d'augmentation de la température,
- l'ajout d'additifs dans l'électrolyte pour réduire la réactivité à l'intérieur des cellules.

Il est donc crucial de pouvoir s'assurer que la sécurité soit correctement maîtrisée quel que soit la technologie retenue.

La figure 15 ci-après décrit les incidents de fonctionnement qui ont potentiellement pour origine la batterie Li-ion, les conséquences des événements initiateurs, et comment les barrières de sécurité décrites peuvent être éventuellement activées, en liaison ou non avec le BMS.

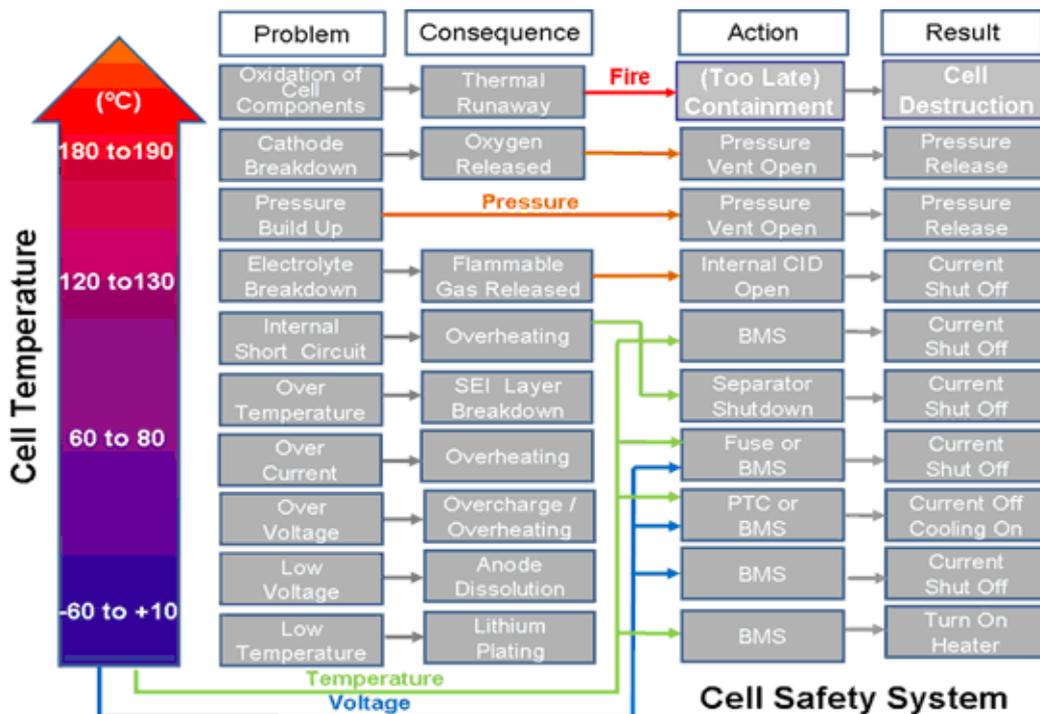


Figure 15 : Gestion du risque d'emballement thermique d'une batterie au lithium (détection des événements initiateurs, conséquences potentielles, nature et effet des actions en liaison avec les dispositifs passifs ou actifs de sécurité (BMS) [29])

Des référentiels de tests de sécurité ont donc été développés par plusieurs organismes ou associations de constructeurs (USABC⁴, FreedomCar⁵, SAE⁶...) pour tester le comportement des batteries soumises à la plupart des situations abusives auxquelles elles sont susceptibles d'être exposées au cours de leur utilisation.

Les protocoles expérimentaux sont souvent peu détaillés et ne proposent pas (ou rarement) de critère d'acceptabilité. Cette situation n'est pas le cas des essais abusifs à réaliser pour permettre le transport des batteries ; les essais T1 à T8 décrits dans les recommandations ONU pour le transport des marchandises dangereuses font tous l'objet de critères d'acceptabilité.

⁴ United States Advanced Battery Consortium Electrochemical Storage System

⁵ Sandia National Laboratories

⁶ Society of Automotive Engineers

De plus, la toxicité des gaz potentiellement dégagés n'est pas prise en compte.

Sur le plan de l'encadrement réglementaire [10], et au-delà des exigences émises par les règlements modaux (air, mer, fer, route) régissant le transport international des batteries, les règlements liés à l'homologation du véhicule R12, R94 et R95 sur les chocs ont été modifiés pour tenir compte des particularités du VE et validés. Ils visent à protéger les conducteurs et les occupants d'un véhicule accidenté contre les chocs électriques (par exemple en sortant du véhicule). En ce qui concerne la batterie, il est également demandé de s'assurer visuellement de l'intégrité du pack batteries après la réalisation de ces tests. Une démarche a été engagée par l'Allemagne pour définir un nouveau règlement rentrant dans le processus d'homologation du véhicule visant à homologuer le système de stockage d'énergie que constitue le pack batteries en tant que composant d'un véhicule.

Etant donnée l'importance du composant batterie dans la gestion des risques des véhicules électriques, il paraît nécessaire de :

- Faire progresser les connaissances sur les problématiques sécurité des batteries en promouvant la réalisation de programmes d'études et de recherche dédiés à l'examen de la sécurité des batteries tout au long de leur cycle de vie (nombre de cycles, état de charge, ...), visant :
 - o à consolider les méthodes expérimentales d'évaluation (notamment sur la caractérisation des gaz et vapeurs toxiques émis en conditions abusives),
 - o à permettre une meilleure compréhension des phénomènes selon les technologies impliquées,
 - o à qualifier les technologies émergentes (compromis performance/degré de sécurité intrinsèque),
 - o qualifier les risques / scénarios à envisager (utilisation, stockage, charge, situations spécifiques...).
- Encourager le processus de référentiels de certification volontaire permettant d'assurer la sécurité des batteries dans les différentes configurations d'utilisation potentielles tout au long de leur cycle de vie, sans attendre l'établissement de référentiels obligatoires
- Soutenir les travaux engagés à l'ONU et destinés à mettre en place une homologation spécifique des batteries en tant que composant du véhicule.

Enfin, la sécurité est largement assurée (protection active) par le BMS (pour *battery management system*) (§ Annexe 2), permettant de contrôler de nombreux paramètres (températures, courants, tensions, niveau de charge, autonomie...) et de déclencher les actions de sécurité en cas de dérive, du type condamnation de l'alimentation électrique par exemple. Le BMS, parmi d'autres fonctions, assure un rôle primordial en matière de sécurité d'usage de la batterie, tant au roulage que lors des opérations de charge à l'arrêt. C'est un dispositif de sécurité indispensable à la prévention des risques d'emballement thermique.

Il est donc particulièrement important que ce dispositif soit conçu pour assurer toutes les opérations utiles (surveillance des températures, des tensions, gestion des charges lentes et accélérées, vérification de l'adéquation de la connectique de charge, sécurité contre les charges par températures extrêmes...) participant à la qualification de la sécurité de la batterie et soit doté d'un haut degré de fiabilité. Les constructeurs imposent en général des seuils élevés d'exigence en sécurité fonctionnelle pour garantir le fonctionnement du système en situation dégradée.

Il est donc nécessaire que les constructeurs rendent également accessibles à l'évaluation des risques, les différentes fonctions effectivement assurées par le BMS.

Il serait donc souhaitable que les méthodes de conception et que les niveaux d'exigence en matière de fiabilité soient harmonisés dans le cadre de normes par exemple.

5.3 SYNTHÈSE DES RISQUES LIÉS AUX BATTERIES

Les principaux risques liés aux batteries ainsi que leurs principales causes et conséquences sont synthétisés dans le tableau 2 ci-dessous.

Risques	Principales causes	Principales conséquences
Formation des « dendrites »	<ul style="list-style-type: none"> - Surcharge - Charge à basse température (< 0°C) - Tension électrique à la charge élevée (> 4,2 V pour une cellule) - Courant électrique de charge important - Concentration de Li+ ions élevée dans électrolyte - Défauts de porosité du graphite (anode) 	<p>La formation de dendrites diminue progressivement et plus ou moins rapidement la résistance interne au CC, voire provoque un court-circuit électrique franc en mettant en contact électrique anode et cathode</p> <p>→ court-circuit interne → Surchauffe --> Emballage thermique --> Eclatement des batteries (effet de projection, perte de confinement des produits inflammables, nocifs et corrosifs) --> Feux, dispersion toxique, épandage des produits corrosifs, etc.</p>
Surcharge	<p>Défaillances de BMS lors de la charge ou conduite:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Défaut du logiciel (software) - Défaut du matériel (hardware), - Défaut des détecteurs - Relai bloqué fermé 	<p>Formation des dendrites</p> <p>→ court-circuit interne → Surchauffe --> Emballage thermique --> Eclatement des batteries (effet de projection, perte de confinement des produits inflammables, nocifs et corrosifs) --> Feux, dispersion toxique, épandage des produits corrosifs, etc.</p>
Sur-décharge	<p>Court-circuit interne ou externe</p> <p>Défaillances de BMS lors de la décharge ou conduite:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Défaut du logiciel (software) - Défaut du matériel (hardware), - Défaut des détecteurs - Relai bloqué fermé 	<p>Dissolution du cuivre de cathode --> Court-circuit interne - -> Surchauffe --> Emballage thermique --> Eclatement des batteries (effet de projection, perte de confinement des produits inflammables, nocifs et corrosifs) --> Feux, dispersion toxique, épandage des produits corrosifs, etc.</p>

Risques	Principales causes	Principales conséquences
Charge à basse température	Température basse et Défaillances de BMS lors de la charge ou conduite: <ul style="list-style-type: none"> - Défaut du logiciel (software) - Défaut du matériel (hardware), - Défaut des détecteurs - Relai bloqué fermé 	Formation des dendrites (très rapide en cas de charge rapide) <ul style="list-style-type: none"> → court-circuit interne → Surchauffe --> Emballement thermique --> Eclatement des batteries (effet de projection, perte de confinement des produits inflammables, nocifs et corrosifs) --> Feux, dispersion toxique, épandage des produits corrosifs, etc.
Charge à haute température	Haute température et Défaillances de BMS lors de la charge ou conduite: <ul style="list-style-type: none"> - Défaut du logiciel (software) - Défaut du matériel (hardware), - Défaut des détecteurs - Relai bloqué fermé 	Surchauffe --> Emballement thermique --> Eclatement des batteries (effet de projection, perte de confinement des produits inflammables, nocifs et corrosifs) --> Feux, dispersion toxique, épandage des produits corrosifs, etc.
Court circuit interne	<ul style="list-style-type: none"> - Formation de dendrites - Présence d'impuretés introduites à la fabrication - Déformation mécanique (choc, vibration, agression externe, vieillissement, variation de température, etc.) 	Surchauffe --> Emballement thermique --> Eclatement des batteries (effet de projection, perte de confinement des produits inflammables, nocifs et corrosifs) --> Feux, dispersion toxique, épandage des produits corrosifs, etc.
Court circuit externe	<ul style="list-style-type: none"> - Perte d'isolation (agressions externes dues aux collisions, vieillissement, etc.) - Erreurs humaines lors de maintenance, réparation ou intervention de secours 	Surchauffe --> Emballement thermique --> Eclatement des batteries (effet de projection, perte de confinement des produits inflammables, nocifs et corrosifs) --> Feux, dispersion toxique, épandage des produits corrosifs, etc.
Electrocution	La tension des batteries peut atteindre 600 V: <ul style="list-style-type: none"> - Perte d'isolation (agressions externes dues aux collisions, vieillissement, etc.) - Erreurs humaines lors de maintenance, réparation ou intervention de secours 	Dangers pour la vie humaine (Techniciens, occupants du véhicule, secouristes, pompiers, policiers, etc.)
Perte de confinement	Rupture mécanique due aux: <ul style="list-style-type: none"> - Température excessive (sous le soleil) - Incendie - Collisions, chocs, - Vieillissement 	Explosion, feux et dispersion toxique
Surchauffe	<ul style="list-style-type: none"> - Température externe élevée - Usage intense - Défaillance des moyens de refroidissement 	Emballement thermique Explosion, feu et dispersion toxique

Tableau 2 : Synthèse des principaux risques liés aux batteries

5.4 RISQUES SPECIFIQUES LIES AUX PRINCIPALES ETAPES DU CYCLE DE VIE DES VE

5.4.1 Conception

Concernant la conception de VE, la principale inquiétude, partagée par des constructeurs, provient du manque de recul de la filière par rapport aux profonds changements qui sont apportés sur le véhicule, son mode de propulsion et les différentes infrastructures devant se mettre en place.

Le développement du véhicule thermique s'est effectué sur la durée et a pu bénéficier progressivement d'un retour d'expériences très fourni. La filière électrique est au contraire censée se déployer très rapidement dans un contexte où tout incident et/ou accident est susceptible de prendre une importance médiatique non négligeable. De tels incidents soulèveraient dans le grand public des questionnements sur le degré de maturité de la filière, même si par le passé (début du siècle dernier), le VE a connu un certain succès (35000 véhicules commercialisés aux USA dans les années 1920).

Les défauts de conception peuvent se produire pour chaque composant du VE ou des infrastructures associées. En général, ces défauts devraient assez vite être détectés et réparés. Ils peuvent cependant être à l'origine de rappels en masse de véhicules.

Outre ces défauts provenant de connaissances insuffisantes, il faut souligner le risque de non respect des bonnes pratiques et des normes de sécurité en vigueur, pour des raisons allant du manque d'informations sur les contextes réglementaires et normatifs, notamment dans le cas des matériels d'importation, jusqu'au non respect intentionnel pour des raisons financières et/ou de respect des délais. Ces manquements aux bonnes pratiques peuvent avoir des conséquences particulièrement importantes, notamment en termes d'image pour les constructeurs.

Il semble donc important pour les industriels :

- de veiller à la mise en place de processus qualité de conception stricts et régulièrement mis à jour,
- de poursuivre un effort de veille technologique et réglementaire permettant de maintenir à jour les connaissances des diverses normes et réglementations, nombreuses et en constante évolution,
- de faire réaliser des audits qualité par des consultants extérieurs sur les processus de conception, voire de faire auditer ceux de ses sous-traitants,
- de faire évaluer systématiquement les performances de sécurité des nouveaux types de batteries envisagées. Ces essais comprendront idéalement des essais en situation réelle, sur une présérie de véhicules gérés ou en flotte captive, à l'exemple du cas de la Prius 4 à Strasbourg,
- de procéder à une exploitation partagée du REX.

Dans les prochaines années, avec la montée en puissance de la filière électrique, des marchés parallèles pourront se développer, tels que la fourniture et/ou l'installation de kits d'adaptation permettant l'électrification (hybridation d'un véhicule thermique à l'origine, renforcement de l'hybridation d'un véhicule hybride simple, conversion d'un véhicule hybride en véhicule hybride rechargeable...) Ce type de marché pourrait induire du « bricolage » chez le particulier ou tout au moins à des pratiques peu fiables chez certains opérateurs et donc engendrer en aval, des situations potentiellement à risques au cours des différentes étapes : utilisation, recharges... L'exemple de la Prius [28] est à ce titre assez instructif comme exemple de modifications pourtant apportées par des professionnels.

Il apparait donc notamment nécessaire de :

- fixer un cadre réglementaire à ces pratiques, comme cela a été fait, de manière rétroactive, pour le GPL après les incidents subis par les véhicules GPL français de première génération,
- limiter ce type d'intervention par la mise en place de protocoles robustes de communication entre le véhicule et l'interface utilisateur,
- appuyer le respect des procédures d'habilitation pour interventions sur les VE (du type UTE C18-510 ou UTE C18-550) dans le cas des professionnels,
- s'assurer de la pertinence des fonctions de sécurité remplies à ce titre par le BMS ainsi que de sa fiabilité de fonctionnement en s'appuyant sur le respect de référentiels normatifs ou de certification reconnus ou à développer.

5.4.2 Fabrication

Selon le modèle de développement choisi par les fabricants de batteries, l'activité de fabrication de batteries peut inclure un nombre variable d'étapes générant chacune des risques spécifiques. Les principales étapes sont :

- Fabrication des électrodes : cette étape, souvent sous-traitée à l'étranger, peut générer des risques liés à la manipulation de produits liquides et pulvérulents, toxiques et/ou inflammables ;
- Fabrication et formage des autres éléments constitutifs d'une cellule (supports conducteurs, séparateurs, liants...) ;
- Préparation de l'électrolyte ;
- Assemblage des cellules (en général technologies film mince) ;
- Fabrication des modules et des packs par assemblage de cellules unitaires et intégration de l'électronique de contrôle ;
- Formage de la batterie : Cette opération consiste à rendre la cellule construite, au départ inerte, active électriquement. Le formage s'opère par cyclage sous contrôle des premières charges et décharges des cellules, au cours de laquelle la SEI (*solid electrolyte interface*), qui constitue une des barrières fondamentales de sécurité d'une batterie Li-ion, se forme : cette SEI limite la vitesse de transfert des ions, et donc de l'énergie associée aux processus normaux de charge et décharge en utilisation courante de la batterie.

Cette barrière de sécurité étant absente au départ de l'opération de formage, celle-ci requiert la mise en place de précautions particulières pour être gérée en toute sécurité. La réalisation de cette opération dans un local dédié ainsi que des mesures de prévention du type détection incendie, voire protection automatique paraissent être des précautions minimales à respecter. Ceci est justifié par le retour d'expérience et déjà intégré par certains acteurs nationaux du domaine.

Au cours de ces différentes étapes, les principaux risques sont des risques conventionnels liés à la mise en œuvre de solvants et de pulvérulents toxiques et /ou inflammables dans des procédés de type batch ou semi-continu.

Les processus de fabrication engendrent également la mise en œuvre de stockages de différentes tailles à toutes les étapes.

Il importe donc de respecter les différentes réglementations encadrant ce type d'activités :

- Code du travail : exigences minimales en matière de sécurité au poste de travail (évaluation des risques, ATEX, habilitations électriques...)
- ICPE : exigences déclinées selon les rubriques ICPE concernées (type de classement de l'activité, réalisation d'études de dangers si nécessaire,...) selon le régime concerné (déclaration, autorisation...)
- Réglementations Européennes sur le contrôle du risque chimique (CLP, Reach...).

La complexité et le nombre de matériaux utilisés dans ces nouvelles technologies, ainsi que leur mode de fonctionnement même, rendent particulièrement complexes les étapes d'identification des dangers conventionnels des matériaux. Ainsi, l'examen des Fiches de Données de Sécurité (FDS) fournies par les différents fournisseurs laisse apparaître des différences importantes ainsi que des lacunes de connaissances.

Un travail de consolidation des FDS des produits utilisés dans les batteries rechargeables est nécessaire, en intégrant le nouveau cadre réglementaire en matière de contrôle du risque chimique (REACH, CLP...). Pour assurer la pertinence des informations sur les produits données dans ces fiches, une revue critique par des organismes extérieurs est recommandée. Par exemple, sur le positionnement des électrolytes utilisés dans les technologies batteries vis-à-vis des nouveaux dangers physico-chimiques induits par le CLP (corrosif pour les métaux...), ainsi que par rapport aux propriétés toxicologiques ou écotoxicologiques.

Il faut souligner que le risque électrique se superpose à ces risques classiques et qu'il convient donc de le prendre particulièrement en compte pour la protection des travailleurs et en tant que source potentielle d'inflammation des ATEX.

De plus, l'émergence de nouvelles technologies de batteries va conduire à la fabrication de prototypes ou de préséries susceptibles d'induire de nouveaux risques ou des risques mal qualifiés. Ce type d'activité doit également faire l'objet d'une attention particulière avec le recours à un local dédié pour l'activité de prototypage avec moyens de surveillance adéquats et évaluations des risques systématiques en cas de changements de technologies.

On peut ainsi noter le développement de batteries dopées par des produits ou matériaux nano-structurés ou utilisant des électrolytes innovants. Il importe dans ce cas, de prendre toutes les mesures préconisées par les règles de l'art pour protéger les opérateurs d'une éventuelle exposition aux risques induits par les nanotechnologies ou ces nouveaux produits chimiques (liquides ioniques,..).

Il faut également noter que l'activité de prototypage n'est pas uniquement pratiquée par les fabricants de batteries mais par de nombreux acteurs de l'activité amont (R&D, centres techniques...).

Problèmes de sécurité dus à des défauts de fabrication

L'analyse de l'accidentologie a montré qu'une des causes majeures conduisant à des courts-circuits internes était l'introduction accidentelle de particules métalliques au cours des étapes de fabrication. Ce risque de court-circuit interne, qui a conduit à des rappels très coûteux et médiatisés de batteries d'ordinateurs portables, peut se révéler à n'importe quel moment du cycle de vie de la batterie, avec des conséquences importantes (surchauffe accidentelle provoquant incendie ou explosion des équipements munis de ces batteries.) Il doit donc se maîtriser dès la fabrication, même si les risques potentiellement induits se concrétisent le plus souvent en aval.

La mise en place de contrôles qualité extrêmement rigoureux au cours des étapes de fabrication est donc importante ainsi que la fabrication en salles propres.

5.4.3 Charge des batteries

5.4.3.1 Formage des batteries

Le formage des batteries est la première charge des batteries. Cette opération est une étape du processus de fabrication industrielle des batteries qui présente des risques importants (retour d'expérience). Elle est donc bien surveillée par les professionnels.

Les réactions électrochimiques sont en effet potentiellement plus énergétiques lors de la première charge, ce qui peut générer des dégagements de chaleur insuffisamment maîtrisés.

Au-delà du contrôle et d'une limitation des caractéristiques (tension, courant...) de charge et décharge lors des premiers cyclages, les défauts de fabrication conduisant au court-circuit interne et à la perte de confinement des électrolytes peuvent être détectés par les moyens adéquats. Cependant, les risques d'emballement thermique et d'incendies occasionnels restent significatifs pendant cette opération (REX).

Pour maîtriser les risques d'emballement thermique et de feux, les procédures opératoires, les mesures de prévention (par exemple : détection de température, de gaz, etc.) et de protection (aération, distance de sécurité, moyens d'extinction, etc.) doivent être particulièrement étudiées et adaptées aux protocoles employés.

5.4.3.2 Charge standard

En général, la charge dite « normale » sera privilégiée dans les parkings ou garages chez les particuliers, car opérable, en théorie, par toute installation électrique domestique. Plusieurs risques sont identifiés pour ce cas :

- risque de court-circuit local (particulier notamment) lié à un défaut de l'installation électrique,
- risques de surcharge du réseau électrique au niveau global, pouvant conduire à des coupures de courant dues à des demandes simultanées excessives,
- risques de chocs électriques pour les utilisateurs dus aux défauts d'isolation électrique,
- risques de compatibilité électromagnétique dus à un fort courant électrique,
- risques d'emballement thermique, feux, explosion et de dispersions toxiques dus aux surcharges ou courts-circuits internes et externes des batteries.

Les risques de feux, explosion et de dispersions toxiques sont accrus en cas de charge dans les lieux confinés.

Les avis sont partagés entre les différents acteurs sur la nécessité ou non d'encadrer la gestion de ces risques, au motif que n'importe quel équipement électrique, appelant la même puissance à l'utilisation que pour la charge d'un VE présenterait le même risque d'engendrer un incident, et au regard de positionnements exprimés en termes de coût/bénéfice.

Un éclairage sur les enjeux peut être apporté par l'analyse d'une récente étude rapportée par Promotelec.

En effet, une étude menée par l'Observatoire National de la Sécurité Electrique (ONSE) indique que sur 6 000 diagnostics électriques obligatoires (réalisés dans le cadre réglementaire régissant les transactions immobilières) réalisés en 2009, 72 % des installations présentaient au moins 3 anomalies simultanément [30]. Les anomalies les plus fréquentes sont présentées dans la figure 16 ci-dessous.

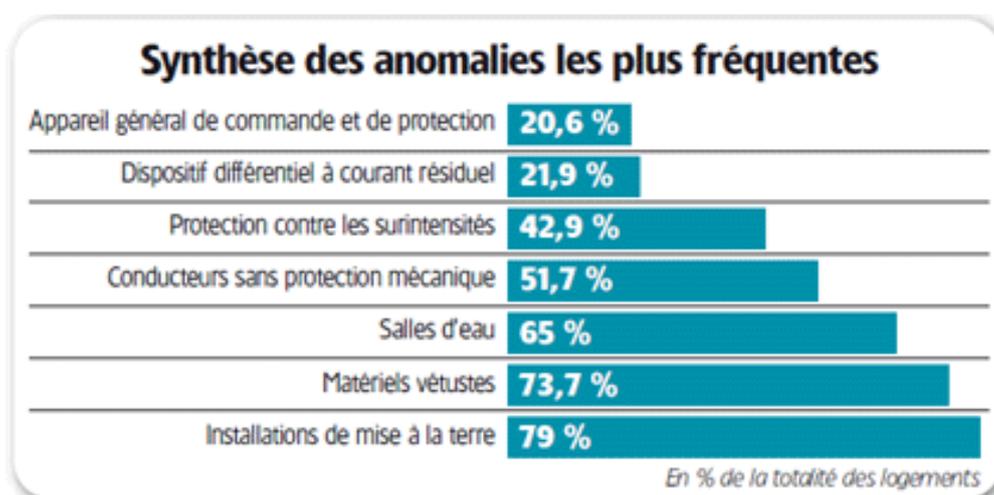


Figure 16 : Synthèse des anomalies électriques les plus fréquentes chez les particuliers [30]

On notera en particulier sur cette figure que les installations électriques non conformes sur le plan de la mise à la terre représentent un cas fréquent pour ne pas dire courant. La mise à la terre est une protection de base contre les effets des courants en cas de défaut d'isolement.

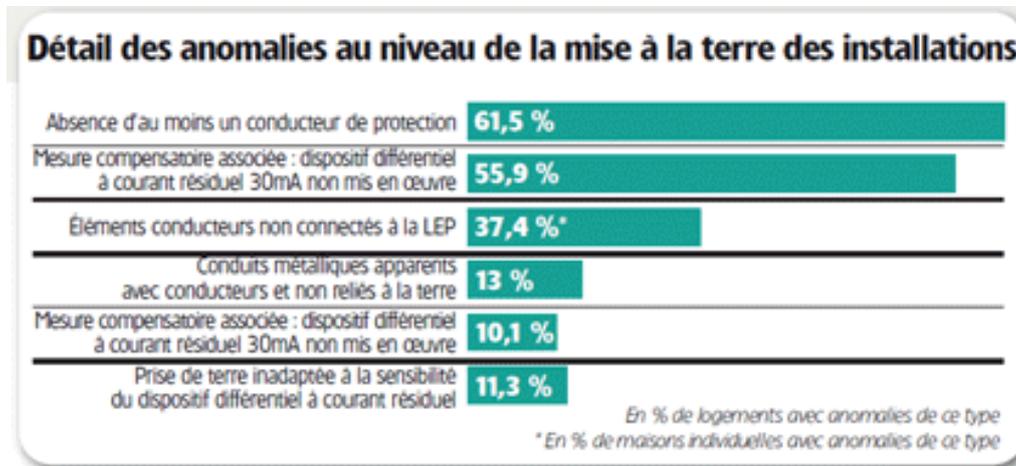


Figure 17 : Classement et importance relative des anomalies des installations électriques relevant de la mise à la terre des installations [30]

La figure 17, tirée de la même étude, illustre plus précisément les types de défauts relevant d'une non-conformité de l'installation sur le plan de la mise à la terre.

A l'analyse de ces chiffres (rappelons que l'établissement du diagnostic n'impose en rien une obligation de réparation par le propriétaire du logement concerné), les risques de dysfonctionnements électriques chez les particuliers au cours des opérations de charge apparaissent bien réels, notamment sur les installations existantes présentant une certaine vétusté. La solution la plus sûre consisterait donc à faire mettre en place par des personnes habilitées des lignes dédiées pour les opérations de charge.

Si cette option n'était pas retenue (coût de quelques centaines d'euros annoncé), il apparaît indispensable a minima d'effectuer une vérification de la conformité de l'installation électrique avant toute utilisation pour une charge électrique, voire d'imposer la réalisation de contrôles périodiques. Mais comment alors contrôler les charges occasionnelles chez les parents et amis des utilisateurs de VE, si une simple prise 16A convient... ?

La mise en place de détecteurs dans les garages peut également être étudiée. Le choix des technologies reste cependant problématique, les détecteurs à CO risquant de se déclencher en cas de fonctionnement du moteur d'un véhicule thermique, et les détecteurs à HF étant très coûteux. Une bonne communication et information des utilisateurs sur ces risques seraient également pertinentes.

Enfin, il apparaît également indispensable que l'effort normatif en cours sur les différents modes de charge aboutisse (prises, connectiques, bornes de charge...) et limite autant que possible les variantes, notamment pour la charge normale chez le particulier. Par ailleurs, les contraintes en termes d'interopérabilité ne doivent pas être édictées au détriment de la sécurité.

Cas particulier de la charge des Vélos à Assistance Electrique (VAE) : Les batteries des VAE pourront être chargées chez les particuliers et au cœur de l'habitation. Il est donc difficile d'exclure de mauvaises pratiques vis-à-vis de la sécurité : charges à proximité d'une source chaude (radiateur par exemple), empilement d'objets sur la batterie gênant la dissipation de la chaleur...

Au-delà des considérations précédentes, il va sans dire que l'information des utilisateurs par les vendeurs (et/ou tout autre canal adapté : assureurs...) représente nécessairement une approche importante pour la sécurité. Ainsi, l'acheteur ou l'utilisateur du véhicule électrique devra être éduqué sur les bonnes pratiques pour la charge et recevoir une information pratique qui -sans être alarmiste- devra l'inciter à respecter des règles de sécurité de base.

De plus, il est nécessaire que les batteries aient un niveau de sécurité robuste pour que la plupart des sollicitations extérieures auxquelles elles puissent être soumises ne soient pas à l'origine de phénomènes dangereux. Pour cela, le développement de normes ou de réglementations idoines imposant ces règles de sécurité minimales paraît indispensable.

Cas particulier des stations-services : La sécurisation de l'approvisionnement en énergie électrique au niveau national soulève inévitablement la question de l'implantation de bornes de recharge (accélérée ou rapide) dans les stations-service. Compte tenu de l'expérience tirée récemment en France lors de l'introduction de nouveaux carburants (Superéthanol en 2007, SP95-E10 en 2008...), il semble prudent de réexaminer la pertinence du cadre réglementaire actuel régissant les stations-service en tant qu'installations classées au regard de la juxtaposition des risques spécifiques à la charge rapide (et autres modèles associés) et des effets dominos potentiels vis-à-vis des risques conventionnels en station-service.

Il paraît judicieux d'introduire des distances de sécurité entre sites dédiés à la recharge électrique, en station-service et autres installations sensibles les équipant (cuves, pompes délivrant les carburants ordinaires...). En pratique, il convient d'envisager une étude dédiée à cette question, dès lors que les caractéristiques techniques des systèmes de charge envisagés seront connues et accessibles pour mener à bien une telle étude. Enfin, il paraît raisonnable de considérer que les stations-service situées en milieu urbain, sur emprise au sol limitée, et/ou implantées en milieu confiné, semblent peu adaptées à l'accueil de ces systèmes de recharge de véhicules électriques.

Cas particulier des parkings couverts: A l'intérieur des lieux confinés, les risques sont généralement plus importants (cf § 5.4.6.3) qu'à l'air libre. Des mesures adaptées peuvent sans doute réduire les risques dans certains cas. Dans d'autres situations, des mesures de restriction, voire d'interdiction d'accès partielle ou totale aux VE et/ou simplement à la charge, sont peut être à envisager. Ici aussi, une étude spécifique paraît nécessaire et requiert les mêmes données d'entrées sur le VE et les systèmes de charge que dans le cas précédent. Du fait de l'introduction des VE dans les parkings, l'adaptation des réglementations régissant les parkings couverts (ERP type PS, règlement des immeubles d'habitation collectifs...) doit être étudiée (est-elle nécessaire, dans quelle mesure ?).

5.4.3.3 Charge rapide

La charge rapide peut être envisagée dans les stations-service classiques ou dédiées pour les véhicules électriques.

La charge rapide présente tous les types de risques de la charge standard (normale), avec des niveaux de risque supérieurs. En effet, la batterie est beaucoup plus sollicitée durant la charge rapide, car le courant de charge est très important, ce qui peut conduire à un échauffement plus intense la charge rapide favorise aussi la formation de dendrites.

Les principaux risques identifiés sont donc :

- risques de surcharge du réseau électrique pouvant conduire à un court-circuit local, à des feux électriques ou à une coupure du réseau du fait des demandes excessives et/ou simultanées lors de la charge rapide,
- risques de chocs électriques pour les utilisateurs dus aux défauts d'isolation électrique et à une tension électrique importante,
- risques de perturbations d'équipements dus aux émissions électromagnétiques associées à courants électriques de charge forts,
- risques de sollicitations abusives des batteries conduisant à des emballements thermiques, formation accélérée de dendrites...
- risques d'inflammation dus à la présence simultanée des sources d'ATEX et de sources d'inflammation supplémentaires (d'origine électriques) dans les stations-service.

Les véhicules électriques ainsi que leurs batteries doivent être adaptés aux différents types de charge rapide, ce qui doit être validé lors de la conception et de l'assemblage des packs. Il faut notamment s'assurer que les dispositifs permettant d'assurer la sécurité de la batterie au cours de son fonctionnement soient correctement dimensionnés par ce type de sollicitations.

5.4.3.4 Charge in-situ en roulage

Ce type de charge in-situ en roulage a lieu en général lors des phases de décélération ou de freinage. Les risques liés aux infrastructures du réseau électrique ne sont plus à prendre en compte au cours de cette opération. Par contre, d'autres agressions externes liées au roulage, comme des vibrations ou des chocs, peuvent survenir.

Le cas particulier où les batteries sont déjà totalement chargées doit être examiné. Le maintien de l'efficacité de freinage et le risque de surcharge accidentelle de la batterie sont à gérer au stade de la conception, et à l'utilisation via le BMS.

5.4.4 Transport

Les risques liés au transport proviennent des dangers intrinsèques des batteries transportées (risques d'emballage thermique...) ainsi que des modalités de transport (conditionnements, types de transport, ...). Le profil des risques atypiques a conduit à un classement au transport de ces matières en classe 9. Comme le souligne l'accidentologie [28], de nombreux incidents ont accompagné le développement du marché des équipements portables contenant notamment des batteries Li, conduisant la FAA⁷ à faire un suivi très attentif des incidents survenus en transport aérien. Les conséquences de ces événements accidentels peuvent être variables selon le mode de transport : la préoccupation du transport aérien est réelle et une pression significative existe, notamment aux Etats-Unis pour durcir encore la réglementation concernée.

Il faut noter que le déploiement du VE va créer et intensifier les flux des systèmes de stockage d'énergie, et donc va faire augmenter le nombre des événements accidentels liés au VE. La taille et la puissance électrique des batteries transportées se démarqueront également très sensiblement des batteries rechargeables pour application portable.

De plus, le transport des batteries hors état neuf pose des problèmes supplémentaires du fait des incertitudes concernant l'état de charge, le degré d'intégrité et la résistance aux sollicitations habituelles au transport.

Les évolutions technologiques en matière de taille et d'électrochimie vont nécessiter une requalification des phénomènes dangereux et de leurs effets potentiels tant vis-à-vis de la gestion des risques transport que de celle des risques au stockage.

La couverture réglementaire des risques associés au transport des systèmes de stockage d'énergie électrique au cœur du développement de la filière VE existe, mais elle nécessite encore des adaptations. Les évolutions réglementaires s'édifient de manière récurrente selon des procédures établies sous l'égide du Conseil Economique pour l'Europe des Nations-Unies (Genève). On rappellera que l'autorité française compétente en la matière (MTMD⁸), les industriels concernés participent activement et de longue date, au bon développement des référentiels techniques réglementant le transport de ces équipements en s'appuyant le cas échéant sur d'autres organismes compétents.

Le déploiement du VE est déjà en grande partie anticipé avec un projet de révision de la section 38.3 du Manuel ONU des épreuves et critères soumis prochainement au vote à l'occasion de la 38^e session du Sous Comité d'experts TMD ONU à Genève. Cette section définit les essais de qualification que, cellules, modules et pack batteries au lithium doivent passer avec succès pour être transportables dans les conditions prévues dans les Recommandations ONU relatives au transport de marchandises dangereuses sous les numéros ONU 3480 et 3481 ([10]). Le transport maritime des technologies basées sur le NIMH ayant récemment été identifié comme posant des problèmes, un numéro ONU a été créé (UN3496) qui régira bientôt ces risques pour ce seul transport.

⁷ FAA : Federal Aviation Administration

⁸ MTMD = Mission Transport Marchandises Dangereuses, rattachée au MEEDTL

Les recommandations sur ce thème sont :

- être proactif dans l'élaboration des textes restant à établir (batteries hors état neuf notamment, prototype ou échantillons ayant subi des essais, super-capacités asymétriques...),
- identifier et consolider si besoin les bonnes pratiques mises en place dans les circuits nationaux de collecte et de transport terrestres des batteries usagées qui ont été expérimentés et rodés pour les petites batteries (un GT spécifique sur le sujet ?),
- utiliser ces données et échanger sur le sujet avec les associations nationales et européennes (recharge...) pertinentes pour étudier le cas des batteries de plus forte puissance développées dans le cadre de l'e-mobilité, et proposer des solutions à l'occasion des travaux futurs du sous-comité d'experts ONU-TMD,
- organiser la traçabilité des incidents et des presque-accidents rencontrés en matière de transport de batteries de puissance en phase de déploiement, pour faciliter le retour d'expérience (cf. initiative FAA pour le transport aérien),
- réaliser une étude pour évaluer dans quelle mesure il est envisageable d'étendre la dérogation portant sur le transport routier de batteries au lithium de grande taille : actuellement, seuls les transports de chargements de packs batteries inférieurs à 333 kg bénéficient d'une exemption aux règles TMD résultant de l'application de l'ADR. Ceci signifie que de nombreux flux de transport (batteries de rechange, batteries envoyées en révision ou vers une destination « seconde vie »...) devront être traités comme transport de MD avec toutes les contraintes induites (formation des acteurs, formalités de transport MD, conseiller en sécurité agréé TMD, aspects économiques...) pour les réseaux de distribution, les garagistes, les réparateurs.

Cette étude dont la teneur devra être définie a minima en concertation avec la MTMD et les services de secours (BSPP – SDIS...) devrait permettre de vérifier si un transport dans une fourgonnette de 1 à 2 packs batteries pose un réel problème (par rapport à un incident sur véhicule classique ou véhicules légers transportant des MD en quantités limitées ou exemptées) en cas d'incident (feu spontané sur le chargement ou post crash du véhicule assurant le transport), en termes d'impacts sur la voie publique ou en termes de gestion de l'intervention. Il convient ici de rappeler que le « syndrome GPL » s'est développé en France suite à un nombre très limité d'incidents ayant blessé des sapeurs-pompiers lors d'interventions sur feu de véhicules GPL mal identifiés. La validation d'une décision de maintien du statu quo ou d'une relaxation des exigences réglementaires est donc de première importance

Comme développé dans le § 5.4.6.3, les conséquences d'un accident à l'intérieur d'un tunnel routier sont potentiellement accrues et il importe donc également de pouvoir adapter ou définir les bonnes pratiques ainsi que les référentiels normatifs et réglementaires adéquats.

Signalons ainsi que le transport de batteries au lithium fait déjà l'objet de restrictions d'accès dans les tunnels (restriction de type E)

5.4.5 Stockage

Bien que les industriels ne puissent pas encore se prononcer précisément sur les quantités concernées, les stockages de batteries rechargeables vont se multiplier à toutes les étapes de leur cycle de vie, y compris sur les sites de recyclage.

On manque aujourd'hui de connaissances sur la propagation d'un incendie provoqué par une source extérieure ou résultant d'un phénomène d'emballement thermique d'une batterie du stockage. Il n'existe par ailleurs pas, à notre connaissance, d'étude publiée à ce sujet préconisant les mesures de prévention et de protection à mettre en œuvre qui soient techniquement justifiées.

Les phénomènes suivants sont ainsi à approfondir :

- connaissance des effets thermiques, toxiques et mécaniques engendrés par un feu d'empilements de modules et de packs batteries éventuellement différents. Pour mémoire, l'incendie de Karlstein (Allemagne) ([28]) a provoqué des projections jusqu'à 300 m du sinistre, et un incendie de faible ampleur, aux Etats-Unis a provoqué l'évacuation préventive de 700 personnes dont 3 écoles, à cause du risque HF.
- mécanismes de propagation d'incendie d'un pack à un autre dans un empilement et conditions d'inflammation à distance (effet domino) d'un empilement à un autre. Il est nécessaire de déterminer des règles d'ilotage (dimensions des empilements, distances inter-empilements...) sur la base de données crédibles en tenant compte de la faible capacité de dissipation de la chaleur par les batteries et des emballements thermiques potentiels.
- outils de modélisation de ces événements accidentels également à développer pour pouvoir réaliser ces études de danger.
- réalité du risque de « réactions thermites », avec les technologies Li-M et Li-ion à qualifier. Ce sujet constitue aujourd'hui un débat d'experts ; en l'occurrence certaines technologies de stockage d'énergie comportent les éléments nécessaires (présence de différents métaux (Al, Cu, Li...) et oxydes de métaux (oxydes de métaux lithiés, titanates...) autorisant en théorie l'amorçage de combustion en phase hétérogène de métaux, à partir de la réduction de certains oxydes métalliques.

Le sujet est évoqué depuis environ 1 an dans les conférences spécialisées, mais aucun résultat concret sur ce sujet n'est disponible dans la littérature ouverte. Ces réactions sont particulièrement énergétiques et développent des températures très élevées (2000 à 3000°C). Ce type de réaction connaît des applications pratiques (telles que le soudage de rails par aluminothermie) mais, non contrôlées, elles peuvent être particulièrement dangereuses.



Figure 18 : Illustration d'une réaction thermitique convertissant un mélange ($Fe_2O_3 + Al$) en alumine (Al_2O_3) + fer

Enfin, on sait que l'amorçage de ce type de phénomène nécessite des températures élevées (environ $1000^{\circ}C$) ; c'est donc plutôt un risque à considérer à l'intervention, en cas d'incendie pleinement développé, a priori.

Par ailleurs, les assureurs pour l'instant communiquent « peu » ou pas du tout sur le risque d'incendie au stockage des batteries, même si des installations automatiques de protection (par sprinklers ou à poudre) ont été installées, malgré les incertitudes sur la pertinence des choix des agents d'extinction (voir paragraphe suivant). Les contacts obtenus avec certains d'entre eux (Zurich, FM Global...) semblent indiquer un certain « retard » dans la réflexion. Sur ce thème, nous prôtons l'organisation d'une journée technique rassemblant les principaux acteurs de la filière électrique française (et/ou européenne) en y conviant les assureurs dommages et les associations professionnelles concernées, ainsi que les cellules techniques des centres d'intervention et de secours pour faire un point technique précis.

Des échanges avec certaines instances militaires, souvent proactives pour assurer la sécurité des personnels mettant en œuvre des matériels innovants à haute performance seraient sans doute utiles ; Par le passé, des organismes américains tels l'US Navy et d'autres ont développé des programmes de recherche significatifs qui ont fait progresser les connaissances techniques sur la sécurisation des systèmes de stockage d'énergie et sur les moyens de lutter contre les feux de tels équipements. On peut ainsi citer les travaux de Rein sur la qualification des feux de lithium métal, publié en 1990.

Enfin, en ce qui concerne la couverture réglementaire des stockages, nous préconisons :

- un examen comparatif de la situation européenne et nord américaine,

- la création d'une rubrique spécifique à l'activité fabrication/stockage de batteries à base de Lithium (cf § 6), notamment pour tenir compte du profil de risque « hybride » (composante risque électrique et composante risque chimique) présenté par les batteries. Cette démarche apporterait du reste une certaine similitude de traitement par rapport aux technologies plomb acide, cadmium et piles au mercure qui sont couvertes par une rubrique activité dédiée.

5.4.6 Intervention / Service de secours

5.4.6.1 Extinctions des feux / Incendies

- **Batteries Li-ion, LiPo : Choix des agents extincteurs et risques de dégagement d'hydrogène**

L'eau réagit de manière violente avec les métaux tels que le Lithium métal pour générer de l'hydrogène, qui peut alors former une ATEX au contact de l'air. Dans les batteries Li-ion, le Li est sous forme ionique et sous forme d'oxyde de métal lithié et est donc considéré comme moins réactif que sous forme métal.

Peu d'informations sont disponibles dans la littérature sur les risques liés à l'extinction d'un feu de batteries par de l'eau et elles sont parfois contradictoires :

- Plusieurs fiches de données de sécurité (FDS) de batteries Li-ion (par exemple : Energizer Rechargeable ACCU Battery pour des batteries primaires) mentionnent les risques de dégagement d'hydrogène pouvant former une ATEX au contact de l'eau. Energizer conseille cependant d'éteindre un feu de batteries avec de l'eau : celle-ci n'éteindra pas le feu mais permettra de refroidir les batteries adjacentes et d'empêcher le développement de l'incendie. Energizer précise toutefois que, dans le cas des petits feux, des extincteurs avec du CO₂, des agents chimiques en poudre ou en mousse doivent être préférés mais qu'ils n'éteindront pas non plus des feux de batteries Li-ion. La FDS des batteries Li-ion d'UNIROSS recommande au contraire de ne pas utiliser d'eau. La FDS de CONCORDE déconseille l'utilisation de l'eau comme moyen d'extinction dans les lieux confinés.
- Le FPRF [4] précise seulement que les agents chimiques en poudre, le CO₂ et les mousses sont souvent les méthodes préférées pour éteindre un feu impliquant des batteries. Ils précisent également que l'eau n'est souvent pas le premier choix en termes d'agents extincteurs. Il faut noter qu'ils ne se positionnent pas plus avant sur ce sujet.
- L'INERIS a réalisé plusieurs essais d'extinction de petites batteries Li-ion avec de l'eau. Il a notamment comparé l'efficacité de quelques agents extincteurs [19] pour éteindre des feux de batteries Li-ion LiFePO₄/C de type « 18650 ». Cette étude a montré l'efficacité de l'eau pour éteindre les feux de batterie sans qu'aucun dégagement d'H₂ n'ait été observé. Cependant, il est bien précisé que les tailles des batteries étant beaucoup plus petites, les résultats ne sont pas extrapolables aux véhicules électriques. Il faut cependant noter que l'eau contribue à solubiliser les acides présents dans les fumées et, par conséquent, à réduire significativement la concentration d'HF. Par contre, l'acide HF est présent dans les eaux d'extinction.

- Plusieurs essais réalisés à l'INERIS (résultats non publiés) sur l'extinction de batteries de plus grosses tailles ont également montré l'efficacité de l'eau comme moyen d'extinction, sans dégagement apparent d'hydrogène. Il faut cependant noter qu'un feu de batteries développé est particulièrement rapide et violent et donc très difficile à éteindre. De plus, ces essais ont également mis en lumière le fait que plus de 10 minutes après l'extinction du feu, une nouvelle inflammation « spontanée » pouvait se produire, générant de plus des concentrations importantes d'hydrocarbures dans les fumées, suffisantes pour former une ATEX au contact de l'air.
- Ces informations sont confortées par des études spécifiques menées par la FAA pour la problématique du contrôle des feux de batteries en soute d'avion [28] qui concluaient à la possibilité de ré-inflammation après extinction. Ces études pointaient également l'inefficacité des halons pour éteindre les feux de batteries LMP.

Ces données nous incitent donc à demander des études plus approfondies pour définir le choix des agents extincteurs les plus adaptés à l'extinction de feux de batteries Li-ion. L'eau utilisée en grande quantité semble donc relativement efficace si l'action est précoce, mais ne permet pas a priori d'exclure tout risque de dégagement d'hydrogène.

De plus, il est particulièrement important de continuer à surveiller une batterie qui a été confrontée à un échauffement car un nouveau départ de feu est possible.

- **Cas des batteries LMP**

La présence de Lithium métal peut être de nature à provoquer une réaction au contact de l'eau d'extinction pouvant générer de l'hydrogène.

Il faut cependant souligner que la quantité totale de Lithium métal dans une batterie de VE sera approximativement de 0.2 kg par kWh [7]. Un VE contiendra une énergie d'environ 25 kWh, ce qui représente environ 5 kg de lithium métal au total.

Nous ne disposons pas d'élément supplémentaire pour décrire les éventuelles conséquences d'une extinction à l'eau d'un feu de batterie LMP.

Ne pas négliger cependant le risque lithium métal sur le/les sites de fabrication des batteries : il est bien évident que sur un feu de stockage de lithium, l'eau est à proscrire.

- **Cas des batteries NiMH**

Dans son ERG (Emergency Response Guide) à l'attention des services de secours, Toyota précise que l'eau est un agent extincteur adapté qui a fait ses preuves. Il n'est pas prévu, à notre connaissance, de sites de fabrication de telles batteries en France. Les quantités stockées devraient donc être limitées, et conséquemment nous n'entrevoions pas de difficultés spécifiques liées à la taille des stockages.

- **Cas des supercapacités**

Les agents d'extinction préconisés sont le CO₂, les mousses spéciales, les poudres chimiques. L'eau n'est pas recommandée car elle considérée comme inefficace (présence de liquides inflammables).

5.4.6.2 Risques au cours des opérations d'interventions

L'apparition de risques spécifiques aux véhicules électriques va obliger les services de secours à s'adapter rapidement.

Cette problématique est abordée de manière plus ou moins complète par les constructeurs, qui doivent rédiger des ERG (*Emergency Response Guide*) à l'attention des services de secours quel que soit le modèle du véhicule (électrique, thermique, GPL...).

Certains constructeurs travaillent avec les pompiers pour les former aux interventions sur leurs véhicules afin que ceux-ci déclinent ensuite la formation en direction de leurs casernes (cas de la formation conjointe Toyota/SDIS 86/ Renault Trucks par exemple).

Avant toute intervention, il est cependant indispensable que les pompiers puissent rapidement identifier un véhicule électrique, ce qui nécessiterait par exemple la mise en place d'un marquage spécifique sur chaque véhicule de ce type.

Il est également nécessaire que les secouristes puissent condamner l'alimentation électrique de haute tension, reliant la batterie au moteur par exemple, avant toute intervention sur un véhicule. Pour cela, ces câbles doivent être bien identifiés et repérés.

Il semble donc essentiel que:

- des guides de bonnes pratiques rassemblant les principes à respecter et actions à effectuer dans le cadre d'une intervention soient rédigés. Il importe qu'une grande cohérence de pratiques soit obtenue au niveau international, a minima au niveau européen. A ce titre un rapprochement avec les efforts conduits sous l'égide de la NFPA (programme de recherche sur 5 ans) visant à mettre en place les bonnes pratiques de sécurité en concevant et déployant un programme de formation pour l'ensemble des acteurs concernés serait utile.
- des normes et standards codifient et harmonisent toutes les informations à fournir par les constructeurs aux services de secours,
- des formations soient dispensées à tous les membres des services de secours susceptibles d'intervenir sur des véhicules électriques.

En ce qui concerne les principales mesures à prendre lors de l'extinction d'un feu de batteries, l'INERIS a émis les recommandations [19] rappelées dans le Tableau 3 ci-dessous.

Risques	Recommandations
Toxiques : <ul style="list-style-type: none"> dégagement gazeux (HF, HCl, NOx...) projection de liquides 	<ul style="list-style-type: none"> port de masques de sécurité gant et combinaison de protection tenue de feu complète avec protection respiratoire
Electriques : <ul style="list-style-type: none"> électrocution 	<ul style="list-style-type: none"> gants isolants
Mécanique : <ul style="list-style-type: none"> projection d'éléments métalliques 	<ul style="list-style-type: none"> tenue de feu complète avec visière baissée ou masque ARI
Thermique : <ul style="list-style-type: none"> risque de brûlure 	<ul style="list-style-type: none"> tenue de feu complète avec visière baissée ou masque ARI

Tableau 3 : Principales recommandations données par l'INERIS pour une intervention sur un feu de batteries [19]

5.4.6.3 Situations accidentelles particulières dans les lieux confinés (tunnels, parkings, stations de péage...)

A l'intérieur des espaces confinés (tunnels, parkings...), les principaux phénomènes dangereux à craindre lors des situations accidentelles sont a priori similaires à ceux susceptibles de se produire à l'air libre :

- développement de feux/incendies,
- dispersion des gaz toxiques émis au cours de la fuite ou issus des gaz toxiques de combustion,
- explosions.

Les conséquences accidentelles à redouter sont cependant plus importantes. En effet, les gaz dégagés vont être moins dilués dans l'air, ce qui va contribuer à la formation de volumes plus importants d'ATEX ou de nuages toxiques. De plus, une inflammation provoquera une explosion aux effets de pression beaucoup plus importants qu'à l'air libre. Enfin, les effets thermiques provoqués par un incendie ou une explosion seront également plus importants.

Les interventions des services de secours sont, de plus, rendues plus ardues du fait de la difficulté d'accès.

Il importe donc :

- de pouvoir mieux comprendre les phénomènes en jeu et de préciser les scénarios d'accident,
- de développer des outils de prédiction fiables des conséquences accidentelles,

- de définir et dimensionner les moyens de mitigation (suppression, ventilation...) à mettre en place, si possible également adaptés au déploiement des autres carburants alternatifs (Biocarburants, PAC, GNL...),
- de mettre en place des normes et standards décrivant les méthodes de management des risques à suivre à l'intérieur des tunnels ainsi que les technologies de sécurité à mettre en place,
- d'aménager le cas échéant les règles de conception des futurs ouvrages (parkings souterrains...) afin de les rendre intrinsèquement plus sûrs et de faciliter les interventions.

Ces actions devront être entreprises dans le cadre d'études et de recherches, au niveau national ou au niveau de consortia Européens (du type L-SURF par exemple – Large Scale Underground Research Facility on Safety and Security).

Il faut également déterminer quelles réglementations spécifiques il sera nécessaire de réviser et notamment de déterminer :

- si l'accès à certains lieux confinés doit être soumis à restriction. Ainsi, on peut noter que dans le cas de l'ancienne génération de véhicules électriques Ni/Cd, l'accès et les charges dans les parkings souterrains étaient subordonnés à l'existence de mesures techniques de prévention des risques (ventilation, détection d'hydrogène...).
- s'il est nécessaire d'imposer des mesures de management de la sécurité, du type nombre maximum de bornes de charges lentes dans un parking souterrain, mesures de détection précoces d'incidents à mettre en place, mesures spécifiques dans le cas des charges rapides... Ces mesures ne pourront être imposées qu'après la conduite d'études ciblées sur les risques liés à ces différents aspects.

5.4.7 Seconde vie et Recyclage

5.4.7.1 Seconde vie

Il est difficile, alors que le développement de la filière électrique émerge seulement en Europe, de préjuger d'éventuelles problématiques sécurité associées aux usages de seconde vie des types de batteries envisagées dans les VE. Cette seconde vie nécessitera des opérations de démontage des véhicules, de collecte, d'acheminements vers des unités de qualification et de reconditionnement des packs batteries, avant une seconde mise sur le marché dont l'importance et les spécificités dépendront de chaque filière de seconde vie envisagée.

Les risques propres aux batteries à gérer lors des opérations correspondantes sont vraisemblablement très semblables à ceux induits dans les étapes précédentes du cycle de vie (les utilisations envisagées appellent encore davantage de puissance que pour l'e-mobilité, certaines demandant le regroupement de capacités de stockage provenant de plusieurs packs). Il faut également prendre en compte les effets non parfaitement cernés du vieillissement des cellules et des packs, en termes d'impact sur l'intégrité mécanique et électrique des éléments au départ de ce processus.

Cette seconde vie qui s'insère entre la mise sur le marché de la batterie par le fabricant et/ou –une fois intégré dans le véhicule – par le constructeur « retarde » dans le cycle de vie l'étape de recyclage final (parfois appelée « troisième vie » de la batterie). Le seul risque spécifique que nous identifions à ce niveau est une perte éventuelle de « traçabilité » des obligations contractées au départ en termes de maintenance subie et de recyclage final de la batterie en fin de vie : la responsabilité en matière de recyclage final (aspects techniques et financiers) devra être clairement définie en cas de transfert de propriété successive de la batterie (fabricant, constructeur, propriétaire(s) du VE, utilisateur en seconde vie jusqu'au recycleur).

5.4.7.2 Recyclage

Pour ce qui concerne l'activité de recyclage proprement dite, les questions de sécurité démarrent avec les activités de collecte et de transport des batteries usagées. En France, deux associations agréées ont mandat officiel (liste agréée au niveau européen) pour participer aux obligations nationales en matière de recyclage de piles et batteries mises sur le marché (l'objectif est fixé à 45% de taux de recyclage/quantité de piles et batteries mises sur le marché européen à l'horizon 2016). La mise en décharge ou l'incinération des batteries rechargeables destinées aux applications industrielles et l'e-mobilité sont clairement interdites : 100% de ces nouveaux flux devront donc être traités.

Compte-tenu des marchés en expansion pour les batteries rechargeables (notamment pour les produits de grande consommation) et des contraintes réglementaires imposant des objectifs croissants en matière de taux de recyclage des batteries en Europe, l'activité de transport de batteries usagées vers les sites de recyclage et l'activité de recyclage va croître. Il est donc important de s'assurer que la croissance d'activité ne va pas compromettre la maîtrise des risques du fait de l'intensification des flux transportés et traités (dimensionnement des installations de traitement, dimensionnement des aires de stockage pouvant devenir critiques dans le temps).

Il faut comprendre aussi que l'activité de recyclage des batteries ayant servi dans leur première vie l'e-mobilité ne se fera pas sur des sites dédiés, mais bien chez des recycleurs de batteries de technologies variées et servant tous les types de marché. Très probablement également, les sociétés géreront en même temps des activités de recyclage de piles non rechargeables et de batteries rechargeables (éventuellement sur des lignes procédés distinctes, selon les électrochimies concernées).

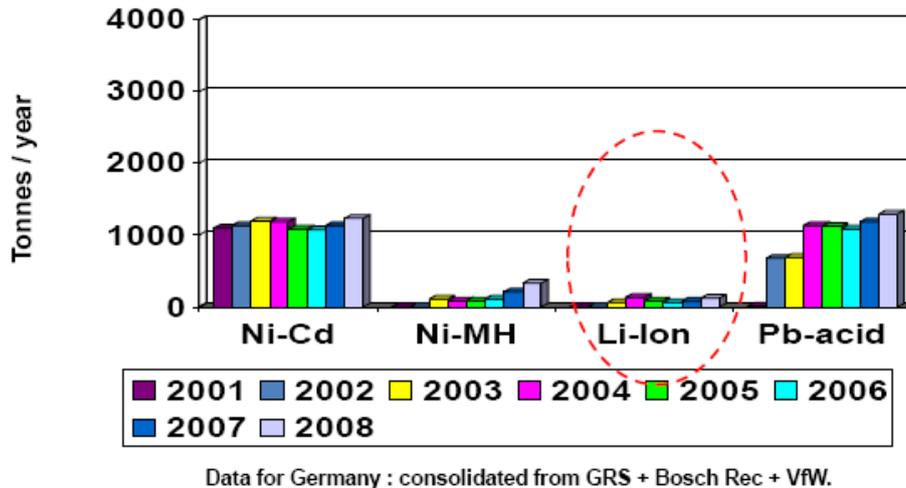


Figure 19 : Statistiques allemandes sur les quantités de batteries rechargeables recyclées en fonction des technologies [14]

Il est à noter par ailleurs que le recyclage des batteries au li-ion constitue encore une activité marginale sans grande expérience propre, même si la faisabilité semble acquise.

Le retour d'expérience fait ressortir des accidents dès la collecte, mais aussi au transport et sur les sites de recyclages impliquant des piles et batteries rechargeables au lithium (métal ou ion) alors que ces technologies sont actuellement extrêmement minoritaires dans le flux actuel de batteries recyclées (cf. figure 19) indiquant la répartition du marché actuel et les tendances escomptées à l'horizon 2020). Une des difficultés récurrentes vient de la plus grande difficulté à maîtriser le risque de court-circuit externe (transport et stockage de piles et batteries en vrac, activités indissociables de l'activité de recyclage de batteries en général).

Certains accidents récents ont démontré l'importance de vérifier la sensibilité de l'environnement de ces sites, au regard du risque potentiel de pollution (eau, sol notamment) ou d'impact sur les activités extérieures (possibilité de perturbation du trafic local, danger de propagation à distance d'incendies (par projection de matériaux enflammés) : la difficulté d'intervention peut nécessiter la mise en œuvre d'une politique de « laisser brûler sous contrôle » à cause de l'hydro-réactivité du lithium métal, si le départ de feu n'est pas circonscrit très rapidement.

Les questions encore non traitées en matière réglementaire au transport des batteries usagées sont identifiées. Une première réunion s'est tenue à Bruxelles le 1^{er} septembre 2010 sur le sujet et va aboutir à une proposition de création d'un groupe d'experts ad hoc pour définir les solutions dans les deux ans qui viennent. De bonnes pratiques sont déjà partiellement en place en matière de transport routier (principal mode utilisé pour cette opération) dans certains pays européens (France, Allemagne notamment, où les capacités de traitement sont les plus élevées).

Les risques identifiés sur les sites de traitement une fois les produits acheminés sur les lieux de recyclage sont les suivants :

- risques inhérents aux propriétés dangereuses des composants des batteries à recycler (combustibilité/inflammabilité, corrosivité, toxicité, danger pour l'environnement...),
- risques d'inflammation spontanée au déchargement ou lors de la mise en stockage temporaire avant tri : le degré de maîtrise de ces risques est affecté par la qualité des conditionnements utilisés pour la collecte et le transport ; le transport des piles et batteries rechargeables de petite puissance en mélange étant une pratique courante,
- risques d'inflammation spontanée liés au stockage de piles au lithium (non rechargeables, 0,2% des flux de piles et batteries en mélange actuellement) ou au lithium-ion après tri pouvant se propager à l'ensemble des produits en attente de traitement si des distances de sécurité entre tas ne sont pas mises en place,
- risques liés aux procédés thermiques ou non thermiques mis en œuvre selon les technologies à recycler : aux risques conventionnels (température ou pression élevée, gestion de courants forts pour la production d'énergie...) s'ajoute potentiellement un manque de maturité des filières de traitement des batteries lithium-ion de forte puissance.

Par ailleurs, les acteurs interrogés ont signalé deux types de «dérives» potentielles :

- celle liée à la faible (voire inexistante) valorisation des matériaux issus du retraitement de certaines technologies de batteries rechargeables (eu égard à la valeur marchande des produits issus du recyclage) : ce serait le cas en particulier des technologies lithium ion reposant sur une cathode LiFePO_4 . Dans ce cas, le coût intégral du recyclage doit être répercuté en amont. Un risque potentiel de mise en décharge ou d'envoi dans des pays moins exigeant sur la question du recyclage est à qualifier et éventuellement à mettre sous contrôle,
- une autre dérive d'activité liée à la présence dans d'autres technologies de batteries d'éléments métalliques à coût élevé (ex. Cobalt) : leur valeur marchande à l'état recyclé pourrait engendrer une activité parallèle illicite : de tels dérapages sont déjà survenus pour le recyclage du cuivre. A titre d'exemple, des activités de brûlage à l'air libre de câbles électriques pour la récupération et la vente de cuivre ont conduit en 1999⁹ à contaminer une production de lait en Normandie La valeur du cuivre induit par ailleurs des incidents de fonctionnement récurrents du réseau ferroviaire national propriété de RFF.

In fine nos recommandations sur ce thème portent sur le lancement des actions suivantes :

- a) mettre en place une veille technologique sur le développement des filières de seconde vie et sur les filières de recyclage des batteries au lithium ion,

⁹ http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/Rdioxines_rap.pdf

- b) participer à l'effort collectif tout juste amorcé pour parfaire la réglementation régissant le transport des batteries usagées (rôle incombant à la MTMD en France),
- c) suivre l'évolution du REX,
- d) dresser un état des lieux des sites de recyclage existants qui participeront à la charge de recyclage des batteries (liées aux utilisations transport) en fin de vie pour évaluer la criticité des sites au regard de l'accroissement progressif et prévisible de l'activité et de leur environnement,
- e) vérifier la pertinence et la lisibilité du contexte réglementaire (ICPE) (rubriques 27xx),
- f) échanger avec l'Allemagne, les Pays-Bas et le Royaume-Uni sur ces sujets.

5.5 ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES (APR) POUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DE VIE DES VEHICULES ELECTRIQUES

Une analyse préliminaire des risques APR a donc été réalisée selon la méthodologie décrite dans le § 3.

Les résultats de cette analyse sont présentés en détail en annexe 1.

51 scénarios ont ainsi été identifiés. Ces scénarios sont positionnés sur la matrice de criticité présentée sur le Tableau 4 et se répartissent de la manière suivante :

- 12 sujets/risques (soit 24%) les plus critiques, positionnés en zone rouge,
- 18 sujets/risques (soit 35%) classés critiques, positionnés en zone orange,
- 20 sujets/risques (soit 39%) classés peu critiques positionnés en zone jaune,
- et 1 sujet/risques (soit 2%) classés non critiques positionnés en zone verte.

Nous rappelons que cette cotation est adaptée au manque de maturité de la filière, notamment en termes de maîtrise des risques, exprimée en besoin de développement de connaissances/compétences. Les scénarios présentés comme les plus critiques sont donc ceux qui méritent une réflexion approfondie en termes d'études de risques, d'acquisition de connaissances et de mesures de réduction des risques pertinentes.

Niveau de criticité	4		16	17; 19; 21; 22; 25; 37; 40; 45	26
	3		8; 10; 13; 34; 38	1; 3; 6; 7; 18; 24; 27; 30; 31; 33; 36; 48	4; 20; 23
	2		9; 11; 14; 32; 35; 39; 43 ; 44	2; 5; 12; 29; 41; 42; 49	15 ; 28; 46; 47; 50
	1		7bis		
Matrice de criticité		1	2	3	4
		Maîtrise des risques : Besoin de développement de connaissances/compétences			

Tableau 4 : APR - Cartographie des scénarios identifiés

6 CONCLUSIONS

Cette étude, conduite par l'INERIS avec l'aide de l'UTAC, a réalisé une Analyse Préliminaire des Risques (APR) de la filière véhicule électrique (VE) tout au long de son cycle de vie (fabrication des systèmes de stockage d'énergie, transport, stockage, intégration dans le véhicule, recharges, utilisations courantes, gestion des situations accidentelles, fin de vie et recyclage) dans le contexte national et propose des ébauches de solution pour maîtriser les risques apparaissant comme les plus critiques lors de la mise sur le marché des premiers véhicules.

Cette étude a combiné différentes approches pour :

- Recenser et décrire les principales nouvelles technologies de stockage d'énergie électrique situées au cœur du déploiement de la filière VE ;
- Identifier et décrire le contexte normatif et réglementaire participant à la maîtrise des risques ;
- Recenser le retour d'expérience (REX) pertinent impliquant les principaux composants (batteries, unités de recyclage...) de la filière VE à partir des bases ouvertes de la littérature scientifique ainsi que d'échanges avec différents experts internationaux sur ces thématiques ;
- Recueillir les informations des principaux acteurs impliqués dans le développement de la filière afin de consolider les données d'entrée nécessaires à l'analyse des risques ainsi que d'identifier les principales options technologiques envisagées pour le déploiement du VE.
- Réaliser et consolider en groupes de travail cette APR.

Rappelons que cette APR s'inscrit dans un contexte très spécifique, dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- Les acteurs envisagent un déploiement de cette filière de manière massive sur le court/moyen terme. Il faut toutefois noter que de nombreux effets d'annonce ne facilitent pas l'appréciation du déploiement effectif.
- Le déploiement est envisagé tant en flotte captive que chez les particuliers avec des usages et des politiques de maintenance éminemment hétérogènes.
- En ce qui concerne le choix des stockages d'énergie mais également des infrastructures associées au VE (train de propulsion, bornes de charges...), il n'y a pas une technologie spécifique envisagée mais de nombreuses variantes :
 - o véhicule tout électrique/véhicule hybride/véhicule hybride rechargeable,
 - o batteries/supercapacités,
 - o batteries Li-Métal-polymère / Li-ion,
 - o nombreuses variantes de cathodes et d'électrolytes pour les systèmes Li-ion,
 - o Charges rapides/charges lentes dans la sphère privée comme publique,
 - o Architecture de train de propulsion série/parallèle/hybride,
 - o ...

- Le manque de recul sur l'exploitation de ces technologies malgré le déploiement antérieur des batteries Li-ion dans le marché des applications portables (ordinateurs, téléphones portables...).

Les plans de développement envisagés sont différents d'un acteur à l'autre et comportent parfois des solutions provisoires dont la mise en œuvre dépendra de nombreux facteurs technologiques, organisationnels et réglementaires. Ainsi, de nombreux acteurs n'ont souvent pas encore arrêté de position définitive sur le choix des technologies qu'ils adopteront à moyen terme.

Ce contexte particulier ainsi que les incertitudes associées rendent très incertaine toute cotation conventionnelle (probabilité/gravité) de situations accidentelles potentielles.

En matière d'identification des scénarios accidentels potentiels, l'étude inventorie essentiellement les scénarios spécifiquement générés par cette filière par rapport à celle du véhicule thermique traditionnel.

En matière de cotation, la criticité des scénarios s'est appuyée sur des indicateurs qualitatifs des notions de gravité et de maîtrise des risques, exprimée en besoin de développement de connaissances/compétences.

L'étude a ainsi identifié 51 scénarios aux conséquences potentielles variables répertoriés dans le tableau 4 et en annexe 1. La figure 20 illustre de manière schématique la répartition de ces scénarios au cours du cycle de vie.

A noter que le BMS étant un dispositif qui assure un rôle primordial en matière de sécurité d'usage de la batterie, tant au roulage que lors des opérations de charge à l'arrêt, la défaillance de ce système a été intégrée dans les scénarios évalués. Pour cela, nous nous sommes tenus à la description des fonctions qu'il assure qui est précisée en Annexe 2.

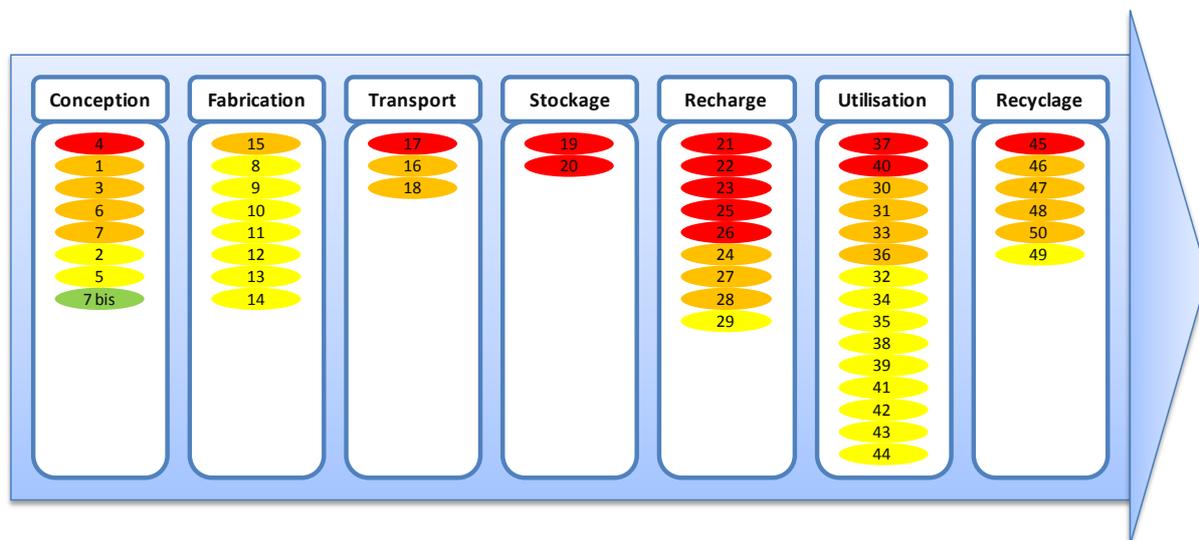


Figure 20 : Répartition des sujets/risques identifiés pour les différentes étapes du cycle de vie de la filière VE. (Le code couleur correspondant à la criticité des scénarios est conforme à celui utilisé dans le tableau 4)

Les scénarios les plus critiques au cours du cycle de vie du VE, selon et avec les limites de la cotation retenue, sont donc :

- *Conception* :
 - N° 4 : Non respect des bonnes pratiques et des normes de sécurité en vigueur,
- *Transport* :
 - N° 17 : Transport en tunnels : conséquences d'un feu en atmosphère confinée impliquant des batteries,
- *Stockage*
 - N° 19 : Scénarios d'incendies ou d'explosions pour des stockages de batteries,
 - N° 20 : Risques électriques et chimiques liés aux stockages de batteries chargées (modèle Quick drop par exemple) sur site dédié ou en station service avec présence du public,
- *Charge* :
 - N° 26 : Problématique spécifique charge rapide, surtout en milieux confinés,
 - N° 21 : Risques de recharge chez les particuliers,
 - N° 22 : Risques de recharge en milieux confinés en général,
 - N° 23 : Problématique spécifique des chargeurs de VAE chez les particuliers,
 - N° 25 : Risques de recharge dans les parkings couverts et autres milieux confinés : Risques accrus d'explosion, feux et dispersion toxiques,
- *Utilisation*
 - N° 37 : Situations accidentelles dans les lieux confinés (tunnels, parkings, stations de péage...),
 - N° 40 : Risques à l'intervention / service de secours dans des situations accidentelles (Feux extérieurs, Feux de batteries (déclenchement dans le VE), Feux intérieurs autres, Crashes, Immersion dans l'eau, etc.),
- *Recyclage*
 - N° 45 : Problématique de gestion des risques au niveau de la collecte, stockage, recyclage et élimination des batteries usagées.

Ces scénarios correspondent donc à des situations jugées à ce stade comme les plus dangereuses en termes d'effets et/ou pour lesquelles le manque de recul et d'informations justifient selon nous un examen plus approfondi de la maîtrise des risques associés. Une telle analyse complémentaire sera alors à même de préciser si la maîtrise des risques est suffisante en l'état ou si des améliorations, aussi bien au niveau technique que réglementaire ou normatif, sont à envisager.

Il faut souligner que la liste de ces scénarios n'est pas exhaustive et que notre analyse n'est pas à même de pouvoir affirmer le niveau de criticité par étape du cycle de vie.

Pour mémoire, les deux principales sources de risques associées aux VE proviennent :

- de la mise en œuvre de systèmes à haute densité d'énergie présentant des domaines d'instabilité en température et en tension susceptibles de conduire à une libération accidentelle et relativement brutale de cette énergie (phénomène d'emballement thermique) tout au long de leur cycle de vie,
- du fait même de l'électrification du véhicule, la présence de courants forts et de tensions élevées nécessitant une prise en compte adaptée de ces risques électriques.

La prise en compte de ces risques à leur juste mesure s'avère, dans certains cas, délicate du fait du manque de retour d'expérience sur les équipements et infrastructures en cours de développement. Il est donc particulièrement important de poursuivre l'accompagnement du déploiement de la filière du VE par un retour d'expérience commun tout en maintenant un effort de Recherche et Développement significatif sur toutes les problématiques ayant trait à la sécurité en intégrant sa dimension internationale. Il est en effet crucial de pouvoir correctement évaluer les différents risques ainsi que de mettre en place les mesures appropriées.

Cette étude a mis en lumière l'importance de l'adaptation du contexte normatif et réglementaire pour encadrer la diffusion des bonnes pratiques industrielles et le bon usage du VE. Ces évolutions seront idéalement éclairées par des études spécifiques (ex : risques liés aux bornes de charge dans les stations services pour faire évaluer le référentiel ICPE correspondant) et en développant des approches concertées au sein des groupes de travail sectoriels, par exemple. Ceci est notamment particulièrement important sur les questions de modes de charge, d'interopérabilité et de connectique.

De plus, l'appui au développement de référentiels de certification ou d'homologation, à promouvoir au niveau Européen et International, représentent des actions complémentaires à poursuivre et à soutenir pour consolider la sécurisation du système de stockage d'énergie.

Suite à cette étude, et au-delà des diverses recommandations formulées, il nous paraît nécessaire d'émettre quelques recommandations à caractère plus général :

- l'importance de privilégier la capitalisation du Retour d'Expérience (REX) via les parcs de VE utilisés en flottes captives. Les expériences acquises sur les générations précédentes de VE (Ni/Cd, Pb/Ac...) ont démontré l'intérêt de ce type de stratégies de démarrage d'une nouvelle filière permettant de cerner dans les meilleures conditions possibles les principales difficultés à surmonter, notamment sur le plan de la sécurité.

Aujourd'hui, de nombreuses initiatives impliquant divers gestionnaires de flottes captives et se prêtant à la capitalisation de ce REX sont effectivement prévues. Ces expériences rendront possibles l'examen en conditions réelles des principaux scénarios critiques mentionnés plus haut sans faire peser de risques significatifs sur le développement de la filière. Ainsi, en ce qui concerne la problématique de la charge rapide, le suivi technique de véhicules témoins procédant à la charge de leur batterie uniquement par charge accélérée ou rapide pourrait être mis en œuvre, que ce soit dans les milieux ouverts ou confinés.

- Cependant, les différents acteurs ont également prévu un déploiement direct chez le particulier qui nécessite la mise en place de mesures de maîtrise des risques adaptées à ces conditions particulières dès les premières phases de mise sur le marché. Nous recommandons a minima :
 - o La mise en place d'actions de sensibilisation sur le bon usage du VE, au cours des phases de charge notamment sur les risques induits par les VE par comparaison avec les risques associés aux véhicules conventionnels ;
 - o L'installation de bornes de charges dédiées chez les particuliers acheteurs de VE et installées ou inspectées par des professionnels agréés. Il convient de rappeler que les diagnostics réalisés chez les particuliers ont montré la fréquence importante de défauts électriques présentés par les installations existantes. Au cours des opérations de charges, ces défauts pourraient être à l'origine de situations accidentelles du type développement d'incendies.
- Il faut également coordonner le développement de cette filière avec les services d'intervention (secours, maintenance, dépannage...) et s'assurer que tous les intervenants potentiels soient formés aux risques induits par ces technologies.
- Enfin, des stockages, parfois conséquents, de batteries seront réalisés à différents stades du cycle de vie (fabrication, assemblage des véhicules, réparation, recyclage...) et il est important de prendre en compte les risques spécifiques qu'ils présentent.

Le développement du VE s'accompagne de ruptures technologiques importantes, y compris au niveau des infrastructures, qui devraient modifier en profondeur les habitudes des professionnels et des utilisateurs. La maîtrise des questions de sécurité représente donc un enjeu primordial pour que cette filière trouve sa juste place dans le développement des véhicules décarbonés et qu'elle ne soit pas freinée brutalement par l'occurrence d'événements accidentels potentiellement médiatisés.

7 REFERENCES

- [1] TANAKA N., Technology Roadmap – Electric and plug-in hybrid electric vehicles, IEA, 2010.
- [2] LEJOSNE J., MARLAIR G., DUPONT L., DEMISSY M., Approche de la maîtrise des risques spécifiques de la filière véhicules électriques : Données de base sur les différentes technologies de stockage d'énergie. 2010.
- [3] EGEBÄCK K.-E. and FOXBROOK L. E., Hybrid Electric Vehicles – An alternative for the Swedish market? KFB, 2000.
- [4] Grant C. C., Fire Fighter Safety and Emergency Response for Electric Drive and Hybrid Electric Vehicles, Fire Protection Research Foundation, 2010.
- [5] Kitada S., Aoyama S., Hattori N., Maeda H. and Matsuo I., Development of a parallel HEV System Incorporating a CVT. The 15th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Sept. 29 – Oct. 3, 1998.
- [6] Takaoka T., Hiroshi H., Hirose K., Nouno Y., Sasaki N., Ueda T., Super High Efficient Gasoline Engine for the Toyota Hybrid System. 1998 FISITA World Automotive Congress. The second century of the Automobile. Paris, September 27 – October 1, 1998.
- [7] Viladot A., Palsson I., Jonsson H., Torstensson H., Risk in Connection with Electric Vehicles, KFB, 2000.
- [8] Madani A., HEV, P-HEV & EV MARKET TRENDS 2008-2020 - Battery is the key!, presentation at the International Power Supply Conference and Exhibition, Batteries 2009.
- [9] <http://www.mpoweruk.com/bms.htm>
- [10] Mulot A., Blanc S., Ficheux S., Approche de la maîtrise des risques spécifiques à la filière Véhicules Electriques, 2010.
- [11] Energie – Nissan recharge ses voitures sans fils, Industrie & Technologies, Hors-série, Octobre 2110, p. 17.
- [12] http://www.mpoweruk.com/battery_manufacturing.htm
- [13] Frost&Sullivan, World Hybrid Electric and Electric Vehicle Lithium-ion Battery Market, September 2009.
- [14] Recharge, PRBA and EBRA, Transportation of used Lithium Batteries, Brussels, 2010
- [15] <http://www.batteryrecycling.umicore.com/UmicoreProces/batteryRecyclingFlowSheet.htm>
- [16] IAIE Data, International Association of Electrical Inspectors, Richardson TX, 2008.
- [17] “Worker Death by Electrocution – A Summary of NIOSH Surveillance and Investigative Findings”, US Department of Health and Human Service, CDCP/NIOSH, may 1998.
- [18] <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/blanquet/synophys/33onelm/33onelm.htm>

- [19] Paillart A. DRA 95. Opération II.B : Batteries/Supercapacités. Les agents extincteurs utilisés dans le cadre d'incendie de batteries Lithium ion. Ref DRA-09-101610-15503A-. 2009.
- [20] Maleki H., Deng G., Anani A., Howard J., J.Electrochem.Soc.146 (1999) 3224-3229
- [21] MacNeil DD, Dahn J.R., J. Electrochem. Soc., 148 (2001) A2105.
- [22] Baba Y., Okada S., Yamaki J.,I., Solid State Ionics 148 (2002) 311.
- [23] Linden D., Reddy T.B., Handbook of Batteries, McGraw-Hill, 3rd Ed.
- [24] Dahn J.R., Fuller E.W., Obrovac M., von Sacken U., Solid State Ionics 69 (1994) 265.
- [25] Howard J., Li-ion Technology Overview, NTSB Hearing, Washington D.C., July 12-13, 2006
- [26] Evan House V., Nano-based Lithium-ion batteries for Electric Vehicles, EPA Pollution prevention through Nanotechnology Conference, September 25-26, 2007 Arlington, Virginia.
- [27] Conte F.V., « Battery and battery management for hybrid electric vehicles : a review » in Elektrochnik & Informationstechnik 123/10 (2006) 424-431
- [28] Marlair G., Dupont L., Demissy M., Accidentologie relative aux systèmes de stockage d'énergie électrochimique : Analyse du retour d'expérience, 2010
- [29] <http://www.mpoweruk.com/safety.htm>
- [30] <http://www.promotelec.com/le-point-sur-les-6000-diagnostics/>

8 LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	N°pages
1	Tableau de l'analyse préliminaire des risques au niveau global de l'ensemble du cycle de vie des véhicules électriques	8
2	Description des véhicules électriques étudiés	10

ANNEXE 1

**Tableau de l'analyse préliminaire des risques au
niveau global de l'ensemble du cycle de vie des
véhicules électriques**

NOTA : Les scénarios marqués en jaune se sont déjà produits et sont recensés dans l'accidentologie

N°	Cycle de vie	Sujets / risques identifiés	Causes	Conséquences	Criticité de ces risques (gravité en cas de réalisation) cotée de 1 à 4	Maîtrise de ces risques (cadre existant ou manquant, sécurités identifiées ou pas...) coté de 1 à 4	Acteurs impliqués et investissant dans l'analyse et la maîtrise de ces risques (privés ou publics)	Suggestions / Préconisations
1	Conception (bureau d'études)	Défauts d'architecture du système : - Architecture du véhicule électrique - Architecture des batteries, BMS - Architecture du train propulseur, du moteur électrique et autres composants... - Mauvaise conception du système de chauffage auxiliaire alimenté par un hydrocarbure classique dans le cas des véhicules tout électrique (exemple : proximité entre le réservoir et les batteries chaudes)	- Manque de connaissance et d'expérience - Référentiels manquants, connaissances scientifiques et techniques insuffisantes... - Non application des bonnes pratiques et des normes de conception et de sécurité - Manque de vérification et optimisation - Pression financière et de temps	Conséquences potentielles sur l'ensemble du système: - Effets latents sur la sûreté de fonctionnement--> pannes ou dysfonctionnements des systèmes ou équipements importants pour les fonctions de sécurité, tels que le système de freinage, le BMS ou le système de contrôle du véhicule durant la conduite ou la recharge, etc. - Défauts mécaniques: Modification du centre de gravité (déséquilibre), résistance mécanique aux chocs, etc... - Perte d'isolation électrique --> chocs électriques, courts-circuits --> emballement thermique - Perte de confinement des produits inflammables, toxiques et corrosifs --> explosion, feux, dispersion toxique, etc. - Les conséquences sont très variables selon les situations: de simples perturbations techniques aux explosions, feux, etc., - Rappel en masse des VE - Acceptabilité sociétale de la filière	3	3	- Bureaux d'études - Constructeurs - Equipementiers - Instances normatives - Pouvoirs publics - Communauté scientifique	- Processus qualité de conception - Mise en place du processus REX de bonnes pratiques - Validation interne et externe par des recherches et expertises - Campagnes de tests de validation sur prototypes - Elaboration de normes dédiées et aides aux programmes de recherches adaptés pour la conception des organes ou des équipements importants pour la filière
2	Conception (bureau d'études)	Défauts techniques lors de la conception: - Sous-dimensionnement mécanique, thermique ou électrique des composants importants pour la sécurité du VE - Choix inapproprié des composants	- Méthodes de calcul erronées - Erreurs de calcul (risques opérationnels et facteurs humains...) - Manque de vérification et optimisation - Pression financière et de temps	Conséquences potentielles sur l'ensemble du système: - Rupture de structure - Effets "missiles" des batteries vers l'habitacle lors de chocs ou collisions par exemple - Perte d'isolation électrique --> chocs électriques, courts-circuits --> emballement thermique - Perte de confinement des produits inflammables, toxiques et corrosifs --> explosion, feux, dispersion toxique, etc. - Les conséquences sont très variables selon les situations: de simples perturbations techniques aux explosions, feux, etc., - Rappel en masse des VE - Acceptabilité sociétale de la filière	2	3	- Bureaux d'études - Constructeurs - Bureaux de contrôle - Instances normatives - Pouvoirs publics - Communauté scientifique	- Processus qualité de conception - Mise en place du processus REX de bonnes pratiques - Validation par des équipes internes et externes - Recherches et expertises - Campagnes de tests de validation sur prototypes
3	Conception (bureau d'études)	<u>Cas particulier du défaut de conception des stockages électrochimiques:</u> - Assemblage non sécuritaire de cellules, - Dispositifs de sécurité actifs ou passifs insuffisants ou mal dimensionnés / positionnés, - Choix inapproprié de l'électrochimie... - Non maîtrise de la technologie, comme la formation de dendrites (dépôts de plaque de Lithium métallique sur la surface extérieure des électrodes)	- Manque de connaissance et d'expérience - Référentiels manquants, connaissances scientifiques et techniques insuffisantes... - Non application des bonnes pratiques et des normes de conception et de sécurité - Manque de vérification et optimisation - Electrochimie de la batterie non adaptée à la charge rapide	- Désolidarisation du pack de batteries - Court-circuit interne --> Emballement thermique - Fuite, perte de confinement d'électrolyte --> Explosion, Feux et Dispersion toxique - Les conséquences sont très variables selon les situations: de simples perturbations techniques aux explosions, feux, etc., - Rappel en masse des batteries - Acceptabilité sociétale de la filière	3	3	- Bureaux d'études - Constructeurs - Bureaux de contrôle - Instances normatives - Pouvoirs publics - Nations Unies - Communauté scientifique	- Mise en place de réglementation et/ou certification des systèmes de stockage électrochimique - Meilleure compréhension des phénomènes pour optimiser les mesures de prévention et de protection - Evaluation des performances de sécurité d'un nouveau type de batteries par tests sur série en flotte captive (ex : Prius 4 à Strasbourg)
4	Conception (bureau d'études)	Non respect des bonnes pratiques et des normes de sécurité en vigueur	- Manque d'information - Manque de procédure ou règle de conception - Erreurs humaines involontaires ou intentionnées dues aux pressions financières et de temps	- Conséquences graves éventuelles sur la qualité de conception, l'image et la réputation pour le concepteur et même pour le constructeur - Défauts d'architecture - Sous-dimensionnement des composants - Les conséquences sont très variables selon les situations: de simples perturbations techniques aux explosions, feux, dispersion toxique, etc., - Rappel en masse des VE	3	4	- Bureaux d'études - Constructeurs - Bureaux de contrôle	- Processus qualité de conception - Veille technologique et réglementaire pour mettre à jour des connaissances sur des nouvelles technologies, normes et réglementations - Audit qualité externe (y compris des sous-traitants)

N°	Cycle de vie	Sujets / risques identifiés	Causes	Conséquences	Criticité de ces risques (gravité en cas de réalisation) cotée de 1 à 4	Maîtrise de ces risques (cadre existant ou manquant, sécurités identifiées ou pas...) coté de 1 à 4	Acteurs impliqués et investissant dans l'analyse et la maîtrise de ces risques (privés ou publics)	Suggestions / Préconisations
5	Conception (bureau d'études)	Modification d'un véhicule par des particuliers et/ou professionnels après première mise sur le marché	- Volonté de transformation de l'alimentation des véhicules accompagnant le développement de la filière - Mauvaise conception du kit d'adaptation - Mauvais montage	- Anomalies de fonctionnement avec remise en cause de la sécurité d'utilisation - Incendie du véhicule	2	3	- Particuliers - Professionnels - Bureaux de contrôle - Pouvoirs publics	- Encadrer réglementairement ces pratiques (comme réalisé a posteriori pour le GPL) - Mise en place de procédures de contrôle des bonnes pratiques - Appui des procédures d'habilitation pour interventions sur les VE (par exemple: UTE C18-510; UTE C18-550) - Limitation des bricolages par la mise en place de protocoles robustes de communication entre le véhicule et l'interface utilisateur
6	Conception (bureau d'études)	Fiabilités insuffisantes de certains systèmes importants pour la sécurité comme le BMS, le système de contrôle du véhicule ou le système de freinage, etc.,	- Niveaux d'exigences de performance insuffisants - Analyse des risques déficiente, comme par exemple les modes de défaillances mal analysés du VE - Exigences de fiabilité insuffisantes	Conséquences potentielles sur l'ensemble du système: - Défaits mécaniques : arrêt brutal, perte de contrôle du véhicule, etc... - Aspects électriques : chocs électriques, court-circuit, etc... --> emballement thermique - Aspects chimiques : perte de confinement des produits inflammables, toxiques et corrosifs --> feux, explosion, dispersion toxique... - Les conséquences sont très variables selon les situations: de simples perturbations techniques aux explosions, feux, dispersion toxique, etc., - Rappel en masse des VE - Acceptabilité sociétale de la filière	3	3	- Bureaux d'études - Constructeurs - Bureaux de contrôle - Pouvoirs publics - Instances normatives - Fournisseur d'énergie ?	- Définitions de niveaux d'exigences de sécurité fonctionnelle (niveaux de SIL) harmonisés en préconisant l'application des normes de la famille IEC-61508 pour toutes les fonctions importantes pour la sécurité - Analyses systématiques des risques de ces composants
7	Conception (bureau d'études)	Risques d'inadéquation entre le management de la sécurité et les nouveaux risques potentiels	- Technologies en évolution permanente - Manque de cohérence et de compatibilité entre différentes générations de technologies - Manque de recul	- Les conséquences sont très variables selon les situations: de simples perturbations techniques aux explosions, feux, dispersion toxique, etc., - Rappel en masse des VE	3	3	- Bureaux d'études - Constructeurs - Bureaux de contrôle - Certificateur - Instances normatives - Pouvoirs publics - Communauté scientifique	- Veille technologique et réglementaire pour mettre à jour des connaissances sur des nouvelles technologies, normes et réglementations - Mises à jour des études de risques, des référentiels, des réglementations, du management de la sécurité...
7 bis	Conception (bureau d'études)	Risque d'inadaptation des prescriptions d'utilisation portées dans le manuel utilisateur	- Didactique insuffisante - Mauvaise traduction - Logos d'interdiction inadaptés	Mauvaise maîtrise du véhicule	1	2	- Fabricants	- Processus qualité - Vérification sur panels types de la bonne compréhension
8	Fabrication (composants, batterie ou assemblage)	Défauts de fabrication, d'assemblage des équipements (Par exemple: Défauts de fabrication du système de stockage électrochimique (contaminations accidentelles, ...))	- Qualité insuffisante de la chaîne de fabrication - Contrôle de qualité déficient - Qualité des matières premières non conforme aux exigences - Facteurs humains et organisationnels: non maîtrise des compétences, erreurs humaines, conditions de travail, etc.	Equipements défectueux --> : - Conséquences latentes sur la sûreté de fonctionnement - Perte d'isolation électrique --> courts-circuits - Perte de confinement des produits inflammables, toxiques et corrosifs --> emballement thermique, explosion, feux, dispersion toxique, etc.	3	2	- Fabricants - Bureaux de contrôle - Pouvoirs publics - Assureurs	- Surveillance du marché- Référentiels qualité - Contrôle qualité des sous-traitants - Cahiers des charges adaptés - REX
9	Fabrication (composants, batterie ou assemblage)	<i>Cas particulier:</i> Risques accrus lors de l'étape de formage des batteries	- Le procédé de formage n'est pas optimisé - Conception déficiente du local - Erreurs humaines (oubli d'une étape dans la procédure, réglage non conforme du courant de charge, etc.)	- Court-circuit interne --> Risques accrus d'emballement thermique, feux, explosion et dispersion toxique, etc...	2	2	- Fabricants - Pouvoirs publics - Assureurs	- Local dédié avec mesures de sécurité incendie adaptées - Création, et application des procédures spécifiques pour cette opération

N°	Cycle de vie	Sujets / risques identifiés	Causes	Conséquences	Criticité de ces risques (gravité en cas de réalisation) cotée de 1 à 4	Maîtrise de ces risques (cadre existant ou manquant, sécurités identifiées ou pas...) coté de 1 à 4	Acteurs impliqués et investissant dans l'analyse et la maîtrise de ces risques (privés ou publics)	Suggestions / Préconisations
10	Fabrication (composants, batterie ou assemblage)	Risques liés à la sécurité des procédés: - Risques incendies, explosions, fuites de produits polluants, toxiques ou corrosifs...au cours des phases de mise en œuvre, stockage, élimination des produits...	Sécurité du procédé mal maîtrisée: - Surpression - Emballage thermique - Formation d'ATEX, etc.... - scénarios accidentels liés à un procédé innovant	- Emballage thermique - Explosions - Feux / incendies - Dispersions toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc....	3	2	- Fabricants (HSE) - Assureurs - Pouvoirs publics (DREAL, inspection du travail...)	- Respect des réglementations de l'environnement et du travail existantes (CLP (Classification, Labelling, Packaging), Reach, ICPE, code du travail, ATEX, ...) - Mises à jour régulières des études de sécurité - Réviser référentiels ICPE si nécessaire
11	Fabrication (composants, batterie ou assemblage)	Risques liés à la réalisation d'essais exploratoires, de qualification, de validation ou de certification des composants sur sites de fabrication	- Erreurs de manipulation dues à la manque de connaissances sur les composants - Mesures de maîtrise des risques insuffisantes - Phénomènes dangereux peu / mal connus - Gestion des échantillons après essais inappropriées - phénomènes dangereux au niveau de la batterie retardés	- Chocs électriques - Accidents au cours de la manutention - Emballage thermique - Explosions - Feux / incendies - Dispersions toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc....	2	2	- Fabricants - Bureaux d'études - Assureurs - Centres d'essais	Elaboration de procédures de sécurité spécifiques sur la gestion des échantillons après essais.
12	Fabrication (composants, batterie ou assemblage)	<i>Cas particulier: (en lien avec scénario 18)</i> Gestion des échantillons soumis à des tests abusifs (connaissance de l'état de charge, dégradations non apparentes...)	- Pas de procédure ou procédure de gestion déficiente - Manipulation des batteries à l'état dégradé après essai	- Chocs électriques - Accidents au cours de la manutention - Emballage thermique - Explosions - Feux / incendies - Dispersions toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc....	2	3	- Fabricants - Pouvoirs publics - Assureurs	- Formation et habilitations électriques des opérateurs - Equipements de protection individuels - Elaboration de procédures de sécurité spécifiques de gestion des échantillons après essais.
13	Fabrication (composants, batterie ou assemblage)	Risques de chocs électriques pour les opérateurs	- La conception du local déficiente - Erreurs humaines (par exemple: oubli d'une étape dans la procédure, réglage non conforme du courant de charge, port d'un bijou métallique, etc.) - Absence de port des EPI (Equipements de Protection Individuels) - Matériels non adaptés	Chocs électriques pouvant conduire à la mort par électrocution	3	2	- Fabricants - Pouvoirs publics - Assureurs	- Formation et habilitations électriques des opérateurs - Equipements de protection individuels (EPI) - Consignes de sécurité strictes - Rédaction des guides de bonnes pratiques
14	Fabrication (composants, batterie ou assemblage)	Risques conventionnels au travail (brulures thermiques ou chimiques, chutes, intoxications, ...)	Causes classiques avec probabilité augmentée due à la présence de procédés et technologies innovantes et énergétiques	Impacts sur la santé des opérateurs	2	2	- Fabricants - Pouvoirs publics (Inspection du travail) - Assureurs	- Formation des opérateurs - Besoin de développement de connaissances et des moyens de prévention et protection
15	Fabrication (composants, batterie ou assemblage)	Risque "nano" liés à l'introduction des nanoparticules dans les batteries qui se répercutent sur les différentes phases du cycle de vie de la filière (Fabrication, Usage, Recyclage, etc....)	Risque "nano", l'introduction de "matériaux nanostructurés" étant appelé (si ce n'est déjà fait) à devenir très rapidement une réalité industrielle (ex. nano LTO : oxyde de titanate lithié en remplacement du graphite pour l'électrode négative, utilisation de nanotubes de carbone...)	- Difficiles à évaluer les caractéristiques physico-chimiques des nanos étant encore mal connues - Dispersion de nanoparticules dans l'air, l'eau - Impacts sanitaires liés à la toxicité potentielle	2	4	- Fabricants - Pouvoirs publics - Communauté scientifique	- Formation et habilitations des opérateurs - Equipements de protection individuels (EPI) - Elaboration de procédures de sécurité spécifiques de manutention des matériaux nano. - Recherche sur les propriétés physicochimiques des nanoparticules et leur utilisation
16	Transport (composants ou pièces recharges)	Accidents TMD (Trains, camions, avions, bateaux...) provoqués/impliquant batteries, électrolytes, ...	- Accidents de circulation: collisions, crash, déraillement, renversement... - Emballage thermique des batteries au cours de transport - intensification des flux liée aux impacts des directives batteries et véhicules hors d'usage (VHU)	- Chocs électriques - Explosions - Feux / incendies - Dispersions toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc....	2 à 4	2	- Pouvoirs publics - Nations Unies - Transporteurs - Industriels - Concessionnaires - Garagistes - Autres organisations internationales régissant les réglementations au transport (IMO, IATA, UE...) - Associations professionnelles	Application et mise à jour de la réglementation TMD au niveau international

N°	Cycle de vie	Sujets / risques identifiés	Causes	Conséquences	Criticité de ces risques (gravité en cas de réalisation) cotée de 1 à 4	Maîtrise de ces risques (cadre existant ou manquant, sécurités identifiées ou pas...) coté de 1 à 4	Acteurs impliqués et investissant dans l'analyse et la maîtrise de ces risques (privés ou publics)	Suggestions / Préconisations
17	Transport (composants ou pièces recharges)	<u>Cas particulier:</u> Transport en tunnels : conséquences d'un feu en atmosphère confinée impliquant des batteries	- Accidents de circulation: collisions, crash, déraillement, renversement... en tunnels impliquant des camions transportant des batteries - Emballage thermique des batteries au cours de transport	- Conséquences accrues de dispersions toxiques, d'effets de surpressions et de propagations d'incendies - Difficulté pour les interventions / services de secours et pour la maîtrise de l'incendie impliquant des batteries - Formation d'ATEX (Evaporation d'électrolyte, formation d'hydrogène au cours des phases d'extinction par l'eau --> Risques d'explosion et/ou incendie	4	3	- Pouvoirs publics - Nations Unies - Transporteurs - Industriels - Concessionnaires - Garagistes	- développement de connaissances, des guides de bonnes pratiques - Application des procédures spécifiques d'utilisation - Développement de réglementation spécifique
18	Transport (composants ou pièces recharges)	Transport des batteries dans un état différent de l'état neuf (après essais, fin de vie, suite à accident ou anomalie...)	Collecte et transport des batteries à recycler	- Chocs électriques - Accidents au cours de la manutention - Emballage thermique - Explosions - Feux / incendies - Dispersions toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc....	3	3	- Pouvoirs publics - Nations Unies - Transporteurs - Industriels - Concessionnaires - Garagistes	Mise à jour et application de la réglementation TMD
19	Stockage (composants ou véhicules)	Scénarios d'incendies ou d'explosions pour des stockages de batteries	- Feu externe ou source de chaleur impactant le stockage - Démarrage d'un feu par emballage thermique des batteries - actes de malveillances provoquant un incendie	- Chocs électriques - Emballage thermique - Explosions - Feux / incendies - Dispersions toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc....	4	3	- Pouvoirs publics - Industriels - Constructeurs - Services d'intervention - Assureurs	- Création d'une rubrique ICPE stockage et/ou fabrication - Recueillir les positions des assureurs sur les moyens de prévention/protection à mettre en place - Limiter les tailles de stockage et évacuer les batteries usagées - Développer des connaissances pour adaptation des outils de modélisation des conséquences accidentelles - Stocker les batteries à l'état de charge minimal - Réfléchir sur l'intérêt d'un stockage temporaire de sécurité juste après la fabrication pour éliminer les batteries avec défauts importants
20	Stockage et manipulation (composants ou véhicules)	<u>Cas particuliers:</u> Risques électriques et chimiques liés aux stockages de batteries chargées (modèle Quick drop par exemple) sur site dédié ou en station service avec présence du public	- Profils de risques atypiques (charges lourdes, haute tension, ...) - Etats de charge variables	- Chocs électriques - Accidents au cours de la manutention - Emballage thermique - Explosions - Feux / incendies - Dispersions toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc....	3	4	- Pouvoirs publics - Industriels - Concessionnaires - Services d'intervention - Assureurs	- Mise en place de lieux de stockages dédiés isolés des autres installations et du public
21	Recharge (chez particuliers)	Risques de recharge chez les particuliers	Présence: - Equipements électriques défectueux (prises, câbles, ...) - Utilisation d'équipements inadéquats (prolongateurs, multiprises, équipements non certifiés pour l'usage...) - Mauvaise utilisation des installations volontaire ou involontaire (système D)	- Emballage thermique - Feux, explosions, dispersion toxiques - Chocs électriques	4	3	- Constructeurs - Bureaux de contrôle - Certificateur - Instances normatives - Pouvoirs publics	- Vérification de la conformité de l'installation électrique avant la 1ère charge et contrôles périodiques ? - Mise en place ligne dédiée ? - Développements de standards harmonisés pour les installations y compris les branchements au niveau VE? - Informer les utilisateurs des risques et bonnes pratiques. - Détection feu ou gaz dans les garages ?
22	Recharge (tous lieux)	Milieux confinés en général	- Milieu confiné - Difficultés de dispersion - Présence de multiples sources d'inflammation - Local multi-usages ...	Augmentation probabilité et gravité (incendies et toxiques) Problématique d'extinction de feux de batteries	4	3	- Bureaux de contrôle - Instances normatives - Pouvoirs publics	- Détection feu, gaz ? - Imposer des restrictions voir interdiction si justifié par la valeur du bâtiment

N°	Cycle de vie	Sujets / risques identifiés	Causes	Conséquences	Criticité de ces risques (gravité en cas de réalisation) cotée de 1 à 4	Maîtrise de ces risques (cadre existant ou manquant, sécurités identifiées ou pas...) coté de 1 à 4	Acteurs impliqués et investissant dans l'analyse et la maîtrise de ces risques (privés ou publics)	Suggestions / Préconisations
23	Recharge (chez particuliers)	Problématique spécifique des chargeurs de VAE chez particuliers	- Possibilité de charges à l'intérieur des habitations sans précaution particulière - mobilité du système batterie/chargeur	- Incendie dans les habitats - Chocs électriques	3	4	- Certificateurs - Instances normatives - Pouvoirs publics - Assureurs - Vendeurs	- Information des utilisateurs par les vendeurs, assureurs - Niveaux de sécurité minimums des batteries assurés par le respect à des normes et/ou réglementation à mettre en place
24	Recharge (stations services)	Recharges dans les stations service: Risques d'inflammation ATEX	Présence simultanée d'une ATEX et d'une source d'inflammation (électrique)	- Explosions - Feux / incendies - Dispersion toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc....	3	3	- Industriels / exploitants - Bureaux d'étude - Bureaux de contrôle - Instances normatives - Pouvoirs publics	- Etudes spécifiques pour les différents types de station - Définir les distances de sécurité
25	Recharge (parkings couverts publics et privés)	<i>Cas particulier.</i> Dans les parkings couverts et autres milieux confinés : Risques accrus d'explosion, feux et dispersion toxiques	- Milieu confiné - Difficultés de dispersion	Augmentation probabilité et gravité (incendies et toxiques) Problématique d'extinction de feux de batteries	4	3	- Bureaux de contrôle - Instances normatives - Pouvoirs publics	- Adaptation de la réglementation parkings couverts - Détection feu ou gaz ?
26	Recharge (tous lieux)	Problématique spécifique charge rapide, surtout en milieux confinés	- Tensions et courants importants - mauvaise architecture spécifique du VE : batteries qui supportent mal ce type de sollicitations, matériels de charge inadaptés...	- Chocs électriques - Emballement thermique - Explosions - Feux / incendies - Dispersion toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc.... - Baisse drastique de la durée de vie de la batterie	4	4	- Bureaux de contrôle - Certificateur - Instances normatives - Pouvoirs publics	- Interdiction chez les particuliers ou mise en place des contrôles spécifiques - Vérification de l'adéquation prises / capacité réseau / besoin du VE - Vérification de l'adéquation d'un VE et d'une borne de charge rapide (BMS..)
27	Recharge (Tous lieux)	Décrochage réseau électrique en cas de sollicitations simultanées	Demandes de puissance trop importantes et simultanées	Risques de coupure de l'alimentation électrique dans un rayon pouvant être importants	3	3	- Gestionnaire du réseau électrique - Pouvoirs publics - Industriels	- Développement en lien avec gestionnaires de production d'électricité - Mise en place de smart-grid
28	Recharge (Tous lieux)	Problématique de la charge à basse température (< 0°C)	- Fragilité des batteries à basse température - Défaillances de BMS ou protection non assurée --> Formation très rapide de dendrites due à des difficultés d'intercalation des ions Li+ dans la structure des graphites à basse température.	- Court-circuit interne - Emballement thermique - Explosions - Feux / incendies - Dispersion toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc.... - Baisse drastique de la durée de vie de la batterie	2	4	- Bureaux d'études - Constructeurs - Instances normatives - Pouvoirs publics - Communauté scientifique	- Développement de systèmes plus robustes à basse température : programmes de recherche en cours. - Gestion de la charge par BMS: Interdiction de la charge à basse température - Fiabilisation du BMS - Information des utilisateurs à mentionner dans les notices d'utilisation
29	Recharge (Tous lieux)	Problématique de la charge à haute température	- Emballement thermique des batteries à haute température - Défaillances de BMS ou protection non assurée	- Explosions - Feux / incendies - Dispersion toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc.... - Baisse drastique de la durée de vie de la batterie	2	3	- Bureaux d'études - Constructeurs - Instances normatives - Pouvoirs publics - Communauté scientifique	- Recherche de couples plus sûrs et de mesures de sécurité adaptées - Gestion par BMS - Formation des utilisateurs, doit figurer dans les notices d'utilisation
30	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	Modification des habitudes de conduite	- Comportement de freinage électrique différent (risque de freinage brutal) - Vibrations différentes - Bruits différents	Probabilité augmentée d'un accident de circulation.	3	3	- Bureaux d'études - Constructeurs - Utilisateurs	- Formation des utilisateurs - Sujet à considérer par les bureaux d'études et les constructeurs
31	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	Perception auditive réduite pour les piétons et cyclistes	Absence de bruit à basse vitesse	Risques accrus d'accidents de circulation	3	3	- Bureaux d'études - Constructeurs - Pouvoirs publics	Thème largement abordé sera pris en compte dans les textes normatifs et réglementaires. Moins de bruit est un confort pour les riverains mais peut présenter quelques dangers pour les piétons. Compromis à trouver.
32	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	Perte accidentelle de puissance électrique	- Défaillance de BMS - Défaillance du système de contrôle du véhicule - Défaillance des batteries	- Arrêt brutal de la motricité du VE - Perte de contrôle du véhicule - Accidents de circulation	2	2	- Bureaux d'études - Constructeurs - Certificateur - Instances normatives - Pouvoirs publics	Imposer une prise en compte de ce risque par le BMS (application de la norme ISO 6469-2 : Mesures de sécurité fonctionnelle et protection contre les défaillances du véhicule)

N°	Cycle de vie	Sujets / risques identifiés	Causes	Conséquences	Criticité de ces risques (gravité en cas de réalisation) cotée de 1 à 4	Maîtrise de ces risques (cadre existant ou manquant, sécurités identifiées ou pas...) coté de 1 à 4	Acteurs impliqués et investissant dans l'analyse et la maîtrise de ces risques (privés ou publics)	Suggestions / Préconisations
33	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	Incompatibilité intra-système: Risques de perturbation électromagnétique d'organes participant à la gestion de la sécurité	- Manque des études sur la compatibilité électromagnétique - Défauts de conception - Défaut de sélection des équipements de qualité	Perturbation ou perte des fonctions de sécurité	3	3	- Bureaux d'études - Constructeurs - Bureaux de contrôle - Certificateur - Instances normatives - Pouvoirs publics - Communauté scientifique	- Risques à qualifier par études spécifiques - Séparation galvaniques entre courants forts et courants faibles ? - Tests de compatibilité électromagnétique - Applicabilité de la directive 1999/519/EC (limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz))? - Applicabilité de la directive 2004/40/EC (prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques))?
34	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	Risques sanitaires des VE	Présence d'ondes électromagnétiques émises par le VE	- Impacts potentiels sur la santé publique - Problème d'acceptabilité sociale	3	2	- Bureaux d'études - Constructeurs - Bureaux de contrôle - Certificateur - Instances normatives - Pouvoirs publics - Communauté scientifique	Risques à qualifier par études spécifiques. Problématique d'acceptabilité sociale
35	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	Gestion de la marche arrière – risques de vitesses trop importantes	Possibilité naturelle de circuler à haute vitesse en marche arrière	Risques d'accidents de circulation élevés	2	2	- Bureaux d'études - Constructeurs - Bureaux de contrôle - Certificateur - Instances normatives - Pouvoirs publics	Limitation de la vitesse de marche arrière
36	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	Situations accidentelles lors du roulage Voir scénario 40. Intervention / service secours	- Emballement thermique de la batterie - Feux, explosion et/ou dispersion toxique suite à un crash - contact accidentel avec de l'eau	Conséquences liées aux dangers potentiels: - Chocs électriques (au contact de tension électrique élevée) - Ecrasement - Radiation thermique, surface chaude (risque de brûlure) - Effets de surpression - Effets "missiles" - Risque d'asphyxie - Effets toxiques - Effets corrosifs (au contact de l'électrolyte)	3	3	- Conducteur - Pouvoirs publics - Services d'intervention - Assureurs - Communauté scientifique	- Qualifier la criticité des scénarios par rapport aux équivalents véhicules thermiques - Réglementation et Certification sur la qualification des stockages électrochimiques en conditions abusives en complément des R12, R14 et R95 sur les crashes. - Soutenir les travaux initiés à l'ONU visant une homologation des batteries et encouragement de l'application de processus de référentiel de certification volontaire adaptée (Par exemple ELLICERT).
37	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	Cas particuliers : situations accidentelles dans les lieux confinés (tunnels, parkings, stations de péage...):	- Difficultés de maîtrise de feux batteries - Présence simultanée des risques électriques, thermiques, mécaniques et chimiques (toxiques, inflammables et corrosifs) - Lieux confinés	- Conséquences accrues de dispersions toxiques, d'effets de surpressions et de propagations d'incendies - Difficulté pour les interventions / services de secours et pour la maîtrise de l'incendie impliquant des batteries - Formation d'ATEX (Evaporation d'électrolyte, formation d'hydrogène au cours des phases d'extinction par l'eau --> Risques d'explosion et/ou incendie	4	3	- Conducteur - Pouvoirs publics - Services d'intervention - Assureurs - Experts de la CNESOR (Commission Nationale d'évaluation de la sécurité des ouvrages routiers)	- Programmes de Recherche sur les moyens de lutte contre l'incendie des batteries à développer - Réglementations spécifiques à réviser selon les cas ? restriction de l'accès, management de la sécurité (nombre de bornes de charges, mesures de détections précoces d'incidents...)

N°	Cycle de vie	Sujets / risques identifiés	Causes	Conséquences	Criticité de ces risques (gravité en cas de réalisation) cotée de 1 à 4	Maîtrise de ces risques (cadre existant ou manquant, sécurités identifiées ou pas...) coté de 1 à 4	Acteurs impliqués et investissant dans l'analyse et la maîtrise de ces risques (privés ou publics)	Suggestions / Préconisations
38	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	Cas des transports multimodaux (tunnel sous la manche, ferries...)	- Présence simultanée des risques électriques, thermiques, mécaniques et chimiques (toxiques, inflammables et corrosifs) - Lieux confinés	- Conséquences accrues de dispersions toxiques, d'effets de surpressions et de propagations d'incendies - Difficulté pour les interventions / services de secours et pour la maîtrise de l'incendie impliquant des batteries - Formation d'ATEX (Evaporation d'électrolyte, formation d'hydrogène au cours des phases d'extinction par l'eau --> Risques d'explosion et/ou incendie	3	2	- Conducteur - Pouvoirs publics - Services d'intervention - Assureurs - Commissions intergouvernementales de sécurité pour les systèmes transfrontaliers	Faire reconnaître ce problème auprès de la prochaine commission intergouvernementale de sécurité du transmanche.
39	Utilisation en roulage (choc, incendie, etc.)	VE au contact d'eau en grande quantité (inondations, crues, ...), surtout pour les cas des véhicules usagés (protections dégradées)	- Défaillance d'isolation électrique - Présence d'eau	- Risque d'chocs électriques - Risques de courts-circuits - Risques d'emballement thermique	2	2	- Conducteur - Pouvoirs publics - Services d'intervention - Assureurs	- Risques à qualifier par les constructeurs - Formation des intervenants
40	Utilisation hors roulage (stationnement, intervention, service de secours, etc.)	Risques à l'intervention / service de secours dans des situations accidentelles : - Feux extérieurs - Feux de batteries (déclenchement dans le VE) - Feux intérieurs autres - Crashes - Immersion dans l'eau Voir § 4.3.1.9. Intervention / service secours	- Difficultés de maîtrise de feux batteries - Présence simultanée des risques électriques, thermiques, mécaniques et chimiques (toxiques, inflammables et corrosifs) - Difficultés d'identification d'un véhicule électrique - Défaut de formation de la part des intervenants	Conséquences liées aux dangers potentiels: - Chocs électriques (au contact de tension électrique élevée) - Radiation thermique, surface chaude (risque de brûlure) - Effets de surpression - Effets "missiles" - Risque d'asphyxie - Effets toxiques - Effets corrosifs (au contact de l'électrolyte) - Formation d'ATEX (Evaporation d'électrolyte, formation d'hydrogène au cours des phases d'extinction par l'eau --> Risques d'explosion et/ou incendie	4	3	- Pouvoirs publics - Services d'intervention - Assureurs - Communauté scientifique	- Moyens d'identification d'un VE - Gestion du risque électrique : possibilité de condamner l'alimentation - Formation de tous les intervenants (pompiers, police, SAMUR, dépanneurs...) - Modalités sécuritaires d'intervention et pertinence des agents extincteurs à qualifier - Rédaction de guides de bonnes pratiques
41	Utilisation hors roulage (stationnement, intervention, service de secours, etc.)	Evacuation du VE après accident (dépannage / intervention): Risque de départ de feu retardé	- Etat de dégradation des batteries peut compliquer leur décharge complète - Etat de dégradation des batteries - Etat de charge inconnu	- Départs de feux - Dispersion toxique	2	3	- Pouvoirs publics - Services d'intervention - Assureurs	- Formation des intervenants - Mise en place de procédures d'évacuation adaptées - Sujet à évoquer dans le groupe de transport ONU TMD ?
42	Utilisation hors roulage (stationnement, intervention, service de secours, etc.)	<u>Cas particulier:</u> Difficultés de gestion du risque électrique des batteries après sinistre	- Etat de dégradation des batteries - Etat de charge inconnu	- Difficultés de décharge complète - Risques accrus durant transit ou sur le site de stockage - Chocs électriques	2	3	- Industriels - Pouvoirs publics - Services d'intervention - Assureurs	- Formation des intervenants - Mise en place de procédures d'intervention adaptées
43	Utilisation hors roulage (stationnement, intervention, service de secours, etc.)	Risques d'incendies au cours du stationnement	- Probabilité accrue due aux chaleurs résiduelles en absence ou arrêt du système de refroidissement - Echauffement en situation climatique extrême	- Emballement thermique de la batterie - Incendie - Augmentation de la gravité due à l'absence de surveillance	2	2	- Bureaux d'études - Constructeurs - Instances normatives - Pouvoirs publics - Services d'intervention - Assureurs	- Prise en compte dès la conception (systèmes de refroidissement régulé y compris dans les phases d'arrêt...) - Dispositifs de détection dans les lieux confinés ou restriction d'accès.
44	Utilisation hors roulage (stationnement, intervention, service de secours, etc.)	Risques de chocs électriques dans les stations de lavage ? ou chez le particulier ?	- Présence d'eau ou humidité - Défaut d'isolation électrique à haute tension	Mis en danger de la vie des utilisateurs	2	2	- Constructeurs - Pouvoirs publics - Services d'intervention - Assureurs	Installations existantes et véhicules à qualifier vis-à-vis de ce risque

N°	Cycle de vie	Sujets / risques identifiés	Causes	Conséquences	Criticité de ces risques (gravité en cas de réalisation) cotée de 1 à 4	Maîtrise de ces risques (cadre existant ou manquant, sécurités identifiées ou pas...) coté de 1 à 4	Acteurs impliqués et investissant dans l'analyse et la maîtrise de ces risques (privés ou publics)	Suggestions / Préconisations
45	Recyclage / élimination	Problématique de gestion des risques au niveau de la collecte, stockage, recyclage et élimination des batteries usagées	<ul style="list-style-type: none"> - Etats de charge inconnus et variés - Chocs mécaniques ou agressions externes dus aux opérations de manutention, transport, stockage - Grande diversité de provenance des flux de batteries (accidentées, fin de vie, maintenance, ...) de technologies différentes. - Probabilités des courts-circuits externes plus importantes lors de transport, manipulation, stockage de batteries en vrac ou conditionnées avec moins de précautions et sans emballage dédié que des batteries neuves 	<ul style="list-style-type: none"> - Chocs électriques - Accidents au cours de la manutention - Emballage thermique-Explosions - Feux / incendies - Dispersion toxiques - Pollution environnementale (air, eau et sol), etc.... 	4	3	<ul style="list-style-type: none"> - Associations professionnelles (Recharge, PRBA...) - Industriels du recyclage - Bureaux d'études- Bureaux de contrôle - Pouvoirs publics - Communauté scientifique - Services d'intervention 	<ul style="list-style-type: none"> - Transport soumis à la réglementation TMD mais celle-ci couvre principalement les batteries neuves. Les batteries usagées ne sont que très partiellement traitées. Il faudrait harmoniser les bonnes pratiques au niveau de l'ONU : soutenir la démarche tout juste amorcée. - Pré conditionner les batteries avant transport en amont du circuit de collecte en les neutralisant (immersion dans eau saline) ou a minima, protection des bornes (pour seconde vie). - Former les intervenants aux risques spécifiques - Stockage : Réviser les référentiels réglementaires ICPE en prenant en compte les spécificités des technologies Li-ion de forte puissance en intégrant le REX significatif. - Identification des mesures de prévention et des sites sensibles et organisation des stockages en conséquence : distances de sécurité, séparations, murs coupe-feu, règles d'ilotage, problèmes d'incompatibilité...
46	Recyclage / élimination	Risques liés à la mise en œuvre de procédés émergents visant au recyclage de l'élément Lithium	Aujourd'hui le Li n'est pas recyclé contrairement aux autres éléments des batteries, ce qui risque de changer au cours du temps. La présence de Li métallique peut rendre ces procédés à risques.	Conséquences liées à la réactivité de Lithium métallique et ses composés comme LiOH ou Li ₂ O potentiellement corrosifs et risque de formation de l'hydrogène en contact avec l'eau --> ATEX, explosion, feux, dispersion toxique, pollution environnementale (air, eau et sol), etc...	2	4	<ul style="list-style-type: none"> - Associations professionnelles (Recharge, PRBA...) - Industriels du recyclage - Bureaux d'études - Pouvoirs publics - Communauté scientifique 	Bonnes pratiques à développer au niveau industriel
47	Recyclage / élimination	Risques nano liés aux procédés de recyclage des matériaux nanostructurés	Présence des matériaux nanostructurés, tels que carbone nanotube, Nano particules de TiO ₂ , etc.	Impacts sur la santé des opérateurs, publics et environnement	2	4	<ul style="list-style-type: none"> - Associations professionnelles (Recharge, PRBA...) - Industriels du recyclage - Bureaux d'études - Pouvoirs publics - Communauté scientifique 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonnes pratiques à développer au niveau industriel - Moyens de prévention et de protection - Réglementation adéquate à développer
48	Recyclage / élimination	Risques liés à l'utilisation des batteries de deuxième vie	<ul style="list-style-type: none"> - Etats de charge inconnus et variés - Etats physiques dégradés - Résistances internes variées 	Risques de surcharge ou sur-décharge importants --> risques accrus d'emballage thermiques	3	3	<ul style="list-style-type: none"> - Associations professionnelles (Recharge, PRBA...) - Industriels du recyclage - Pouvoirs publics 	<ul style="list-style-type: none"> - BMS dédié et performant - Moyens de détection de température
49	Recyclage / élimination	Apparition de filières de traitement illicites	Recyclages opportunistes liées à la valeur ajoutée des matériaux des batteries (cobalt par exemple) par des particuliers/professionnels dans des conditions illégales	<ul style="list-style-type: none"> - Non maîtrise des règles de sécurité et des impacts sanitaires - Perturbation du marché légal du recyclage 	2	3	<ul style="list-style-type: none"> - Pouvoirs publics - Associations professionnelles 	- Contrôle de la mise en place des filières
50	Recyclage / élimination	Problématiques liées aux coûts élevés du traitement de certaines électrochimies (exemple : LiFePO ₄)	<ul style="list-style-type: none"> - Faible valeur des produits recyclés - Coûts non suffisamment intégrés lors du développement de la filière 	<ul style="list-style-type: none"> - Décharges sauvages avec impacts sur l'environnement et la sécurité des personnes - Développement de filières de traitements illégales (exemple : expédition vers des pays lointains) 	2	4	Tous les acteurs de la filière	<ul style="list-style-type: none"> - Anticipation des coûts de recyclage d'une filière et intégration de ceux-ci en amont - Soutien des filières de recyclage - Recherche de débouchés pour les produits de valorisation

ANNEXE 2

Description des véhicules électriques étudiés

Les différents types de véhicules électriques étudiés ainsi que leurs composants ont été détaillés dans l'étude consacrée à la description des différentes technologies [2]. Dans cette annexe, sont rappelées et complétées leurs principales caractéristiques.

1. LES CYCLES ELECTRIQUES

Les cycles électriques sont des véhicules à deux ou trois roues. Ce sont des vélos (appelés Vélos à Assistance électrique, VAE) ou motos (scooters) électriques. De façon générale, les cycles électriques sont constitués d'un moteur, de batteries, d'un contrôleur ou variateur (il commande l'intégration entre tous les éléments : batteries, moteur et accessoires) et de capteurs (capteur de pédalage, témoin de charge...).

Les technologies utilisées ainsi que les degrés de fiabilité pour chaque constituant sont très divers.

Différents types de batteries sont utilisés pour les cycles électriques [2]:

- les batteries au plomb (Pb),
- les batteries au nickel comprenant les Nickel Métal Hydrure (NiMH) et historiquement les Nickel Cadmium (Ni-Cd), l'effet mémoire de ces dernières ainsi que les restrictions sur l'usage du Cd pour des motifs environnementaux les ayant condamnées,
- les batteries au lithium comprenant les Lithium-ion (Li-ion), les Li-ion-polymères (LiPo) et les Lithium-Métal-Polymères (LMP).

Actuellement, les batteries au lithium ou les couples Nickel-Métal Hydrure sont celles qui s'imposent sur le marché et qui seront a priori largement prédominantes dans les prochaines années.

2. LES QUADRICYCLES ELECTRIQUES ET LES VEHICULES ELECTRIQUES DE CATEGORIES M1 ET N1

Les véhicules électriques sont répartis dans deux grandes catégories principales :

- les véhicules tout électriques (EV ou BEV – Battery Electric Vehicle),
- les véhicules électriques hybrides :
 - o les véhicules électriques hybrides non rechargeables (HEV – Hybrid Electric Vehicle),
 - o les véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle).

Ces deux types de motorisation (véhicules tout électriques et véhicules électriques hybrides) sont actuellement envisagés par les constructeurs. Il est vraisemblable qu'ils coexisteront sur les routes pendant plusieurs années.

Les véhicules électriques ont des fonctionnalités supplémentaires par rapport aux véhicules traditionnels [2]:

- l'optimisation de la gestion d'énergie des accessoires électriques,
- l'arrêt du moteur à l'arrêt et démarrage automatique (« stop and start »), premier stade de l'hybridation (« micro » or « mild hybrid » selon les terminologies consacrées)

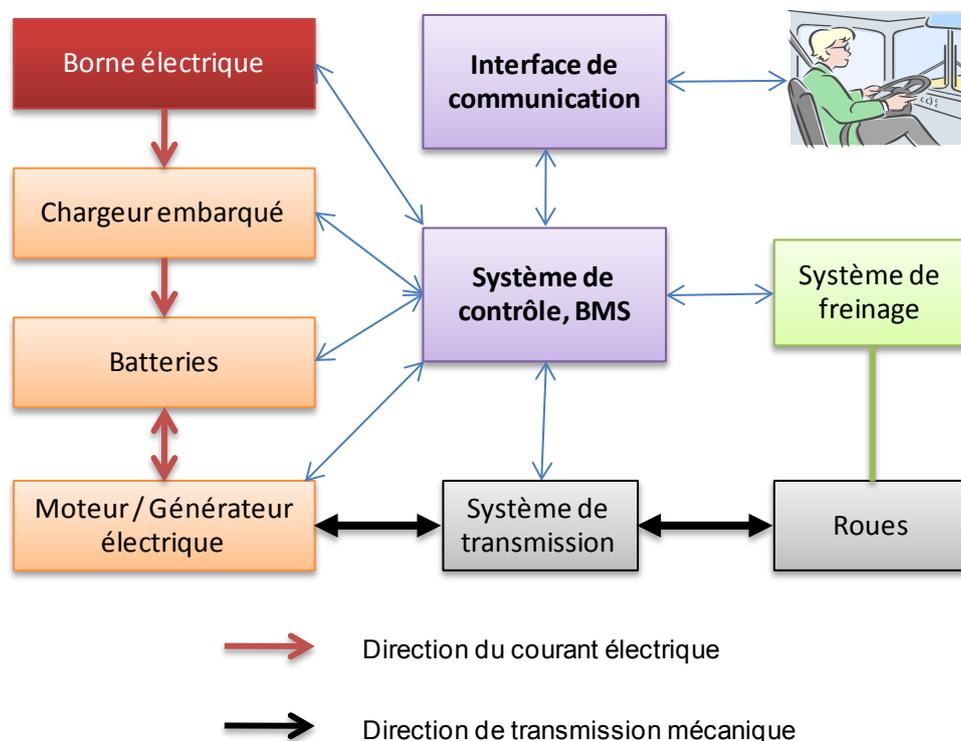
- le freinage par récupération d'énergie (« regenerative braking »),
- l'assistance électrique à la traction ou booster (« Motor assist »),
- le mode tout électrique ou \ Zéro Emission Véhicule (EV drive),
- la recharge batterie sur le réseau (via chargeur intégré ou borne de recharge).

2.1 VEHICULE TOUT ELECTRIQUE

Les véhicules tout électriques fonctionnent uniquement à l'aide d'un moteur électrique (un groupe propulseur) utilisant une seule source d'énergie électrique accumulée dans des batteries. Les batteries sont rechargeables sur une borne de chargement électrique dans les lieux privés (garages ou parkings) ou sur les lieux publics (parkings, stations services, « Quick drop »).

En cas de freinage ou de décélération, l'énergie cinétique du véhicule est convertie en électricité par le moteur électrique du véhicule. L'électricité générée est ensuite récupérée par les batteries pour être stockée. Ce système permet aussi d'éviter le problème de surchauffe du système de freinage mécanique conventionnel en cas de freinage de longue durée.

Le principe de fonctionnement du véhicule tout électrique peut-être illustré dans la figure 1.



BMS: Battery Management System

Figure 1 : Schéma de fonctionnement du véhicule tout électrique

Ce principe de fonctionnement concerne tous les types de véhicules traités dans cette étude :

- les cycles électriques (motos, scooters et vélos à assistance électrique),
- les quadricycles et les véhicules électriques de catégories M1 et N1 (voitures et camionnettes).

2.2 VEHICULE ELECTRIQUE HYBRIDE

Les véhicules électriques hybrides (sauf hybridation légère) possèdent deux moteurs : l'un fonctionne avec du carburant (moteur thermique), l'autre est électrique. Les batteries permettent d'alimenter en énergie le moteur électrique et ainsi de suppléer, à la demande, au moteur thermique.

Actuellement, on distingue deux [3] ou trois configurations [4] types de véhicules hybrides selon les auteurs :

- les véhicules hybrides avec montage du train propulseur « en série »,
- les véhicules hybrides avec montage du train propulseur « en parallèle »,
- les véhicules hybrides mixtes avec montage du train propulseur en série-parallèle.

Il faut noter que cette dernière configuration de véhicules mixtes en série-parallèle a été classée dans la catégorie des véhicules hybrides en parallèle par KFB [3] ou Kitada [5].

Théoriquement, l'efficacité du moteur thermique des véhicules hybrides en série est plus élevée que celle des véhicules hybrides en parallèle, car le régime de fonctionnement du moteur thermique peut être maintenu plus stable [3]. D'autre part, le système de transmission mécanique et le système de contrôle des véhicules hybrides en série sont plus simples et plus proches de ceux des véhicules tout électriques.

Cependant, les véhicules électriques en série exigent des batteries plus performantes. Ainsi, **les poids et coût des batteries** sont plus élevés sur ce type de véhicule. Actuellement, la configuration en parallèle est donc majoritairement adoptée pour les véhicules légers par la plupart des constructeurs automobiles (Honda [5], Toyota [6], Nissan, Ford, BMW par exemple) [3]. Par contre, Mercedes, qui se focalise sur les véhicules « haut de gamme », conçoit ses futurs véhicules légers avec la configuration en série.

Pour les véhicules lourds, qui peuvent supporter des packs de batteries plus importants, la configuration en série est en général retenue [3].

Le principe de récupération de l'énergie cinétique en cas de freinage ou de décélération est identique à celui des véhicules tout électrique. Les batteries des modèles rechargeables (Plug-in) se rechargeront également sur une borne de chargement électrique dans les lieux privés (garages ou parkings) ou publics (parkings, stations services, Quick drop).

Les principes de fonctionnement de ces 3 différents types de véhicules hybrides sont décrits brièvement dans les paragraphes ci-dessous.

2.2.1 Véhicule électrique hybride avec train propulseur en série

Dans le cas des véhicules électriques hybrides en série, le moteur de combustion interne est placé en série avec le moteur électrique. La fonction principale du moteur thermique est donc de générer l'électricité qui sera stockée dans les batteries et qui pourra ensuite être fournie à la demande au moteur électrique. Il n'y a donc pas de connexion mécanique directe entre le moteur thermique et les roues du véhicule.

Ce type d'architecture est représenté sur la figure 2.

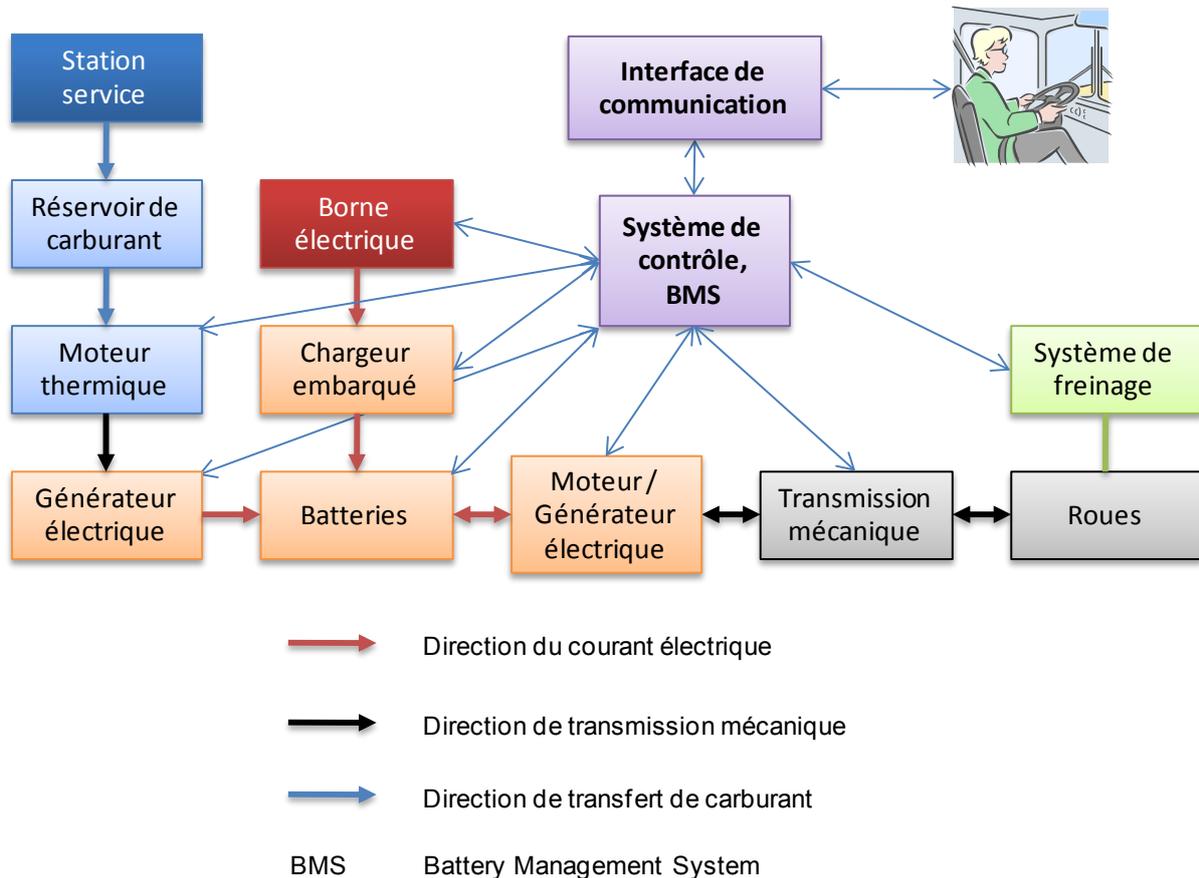


Figure 2 : Schéma de fonctionnement du véhicule électrique hybride en série

Pour ce type de configuration, le moteur thermique est généralement plus petit que celui des véhicules conventionnels. Comme il n'y a pas de connexion mécanique directe entre le moteur thermique et les roues motrices, le régime de fonctionnement du moteur thermique est assez constant. La vitesse du véhicule est contrôlée directement par le moteur électrique ce qui rend inutile le système d'embrayage des véhicules conventionnels.

Au cours de certaines phases de conduite gourmandes en énergie, plus de 50% de l'énergie devra être fournie par les batteries, ce qui implique donc la mise en œuvre de batteries de grande capacité.

Les principales différences avec les véhicules électriques hybrides en parallèle sont les suivantes :

- la masse des batteries à embarquer, et donc le potentiel de danger est plus important,

- le moteur électrique est plus puissant,
- les coûts liés à ces équipements sont donc également plus importants.

Cette configuration est généralement retenue pour les véhicules lourds.

2.2.2 Véhicule électrique hybride avec train propulseur en parallèle

Dans le cas de cette configuration, la traction du véhicule est assurée par deux moteurs thermique et électrique fonctionnant en parallèle (voir figure 3).

Le moteur électrique n'a donc pas besoin d'être aussi performant que dans le cas du véhicule tout électrique ou du véhicule hybride en série et les batteries embarquées pourront donc être plus légères.

Le système est cependant plus complexe et nécessite l'utilisation de deux embrayages, un pour chaque type de moteur.

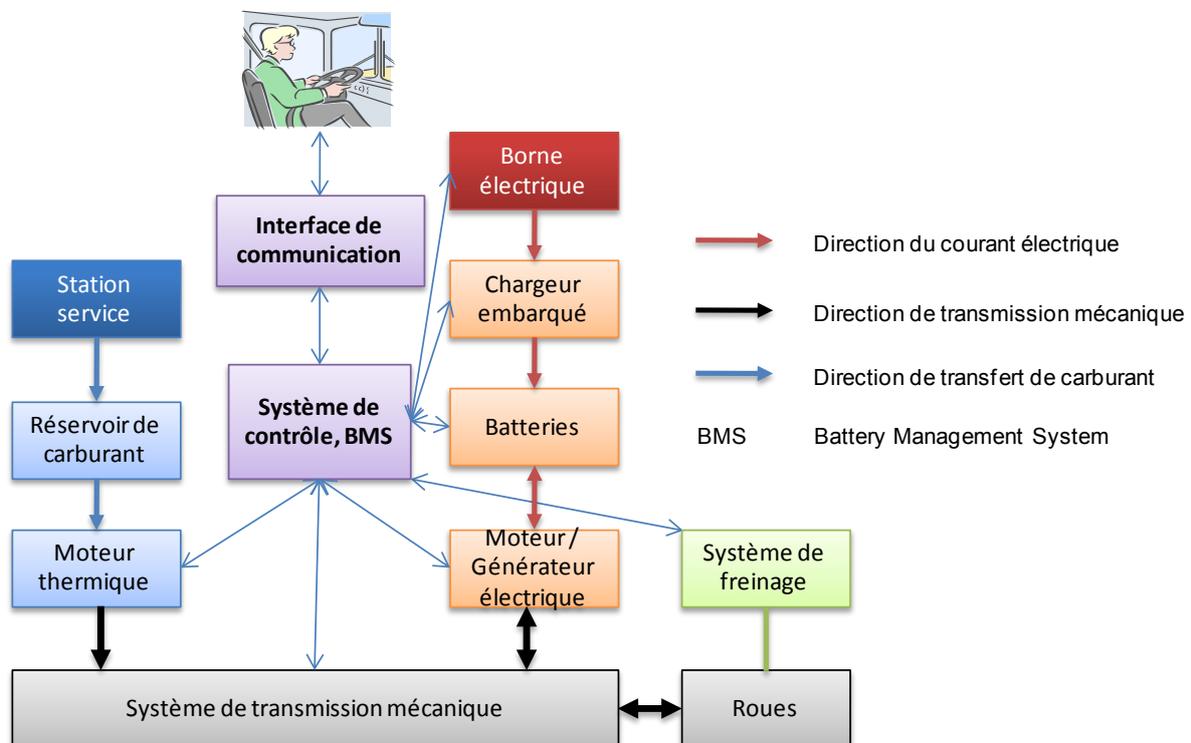


Figure 3 : Schéma de fonctionnement du véhicule électrique hybride en parallèle

2.2.3 Véhicule électrique hybride avec train propulseur en série-parallèle

Pour ce type de configuration, la traction du véhicule est également assurée par deux moteurs thermique et électrique en parallèle. Il existe cependant un générateur électrique supplémentaire qui permet de charger la batterie à partir du moteur thermique.

Ce type de véhicule possède toutes les fonctionnalités des véhicules hybrides en série et en parallèle. C'est celui qui est majoritairement retenu par les constructeurs bien que ce soit également le plus complexe.

Le principe de fonctionnement de ce type de véhicule est illustré dans la figure 5.

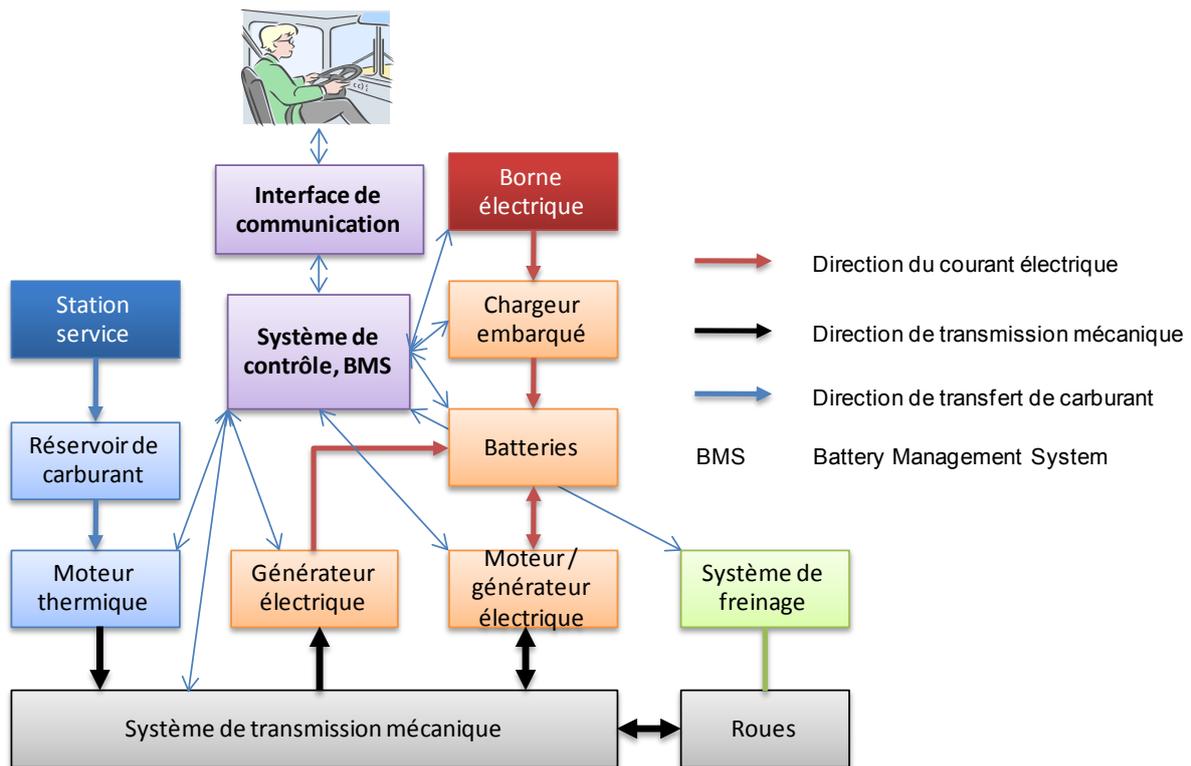


Figure 4 : Schéma de fonctionnement du véhicule électrique hybride en série-parallèle

3. DESCRIPTION DES SYSTEMES ET DES COMPOSANTS

Dans ce chapitre, seuls les systèmes et composants spécifiques aux véhicules électriques sont passés en revue.

3.1 LES SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE

Les différentes technologies sont largement détaillées dans le rapport [2]. Les batteries rechargeables sont les systèmes les plus couramment utilisés pour l'e-mobilité ; d'autres technologies parfois complémentaires peuvent être utilisées, comme les supercapacités, qui conviennent notamment pour des fonctions d'hybridation légère telle que la récupération d'énergie de freinage. Plus rarement (transport en commun de type tramways...), les supercapacités peuvent constituer les principaux systèmes de stockage d'énergie embarqués.

3.2 LE RESERVOIR DE CARBURANT

Le réservoir de carburant ne concerne que les véhicules électriques hybrides et véhicules hybrides rechargeables. Il est de plus en plus souvent (pour ne pas dire exclusivement) fabriqué en matériaux plastiques comme le PE (Polyéthylène) pour alléger le véhicule et résoudre les problèmes de corrosion.

3.3 LE GROUPE PROPULSION

- **Le moteur électrique**

Le moteur électrique convertit l'électricité en énergie mécanique par la génération d'un champ magnétique. Le moteur électrique comprend classiquement :

- la bobine qui génère le champ magnétique à partir de l'énergie électrique,
- le rotor qui tourne sous l'effet du champ magnétique,
- un dispositif de commutation ou un commutateur qui inverse les forces magnétiques et fait tourner le rotor.

Avantages du moteur électrique par rapport au moteur thermique

- L'efficacité des moteurs électriques est assez élevée entre 85% et 95%. Elle est bien plus élevée que celle des moteurs thermiques.
- La boîte de vitesse n'est plus exigée en utilisant des moteurs électriques, la vitesse du véhicule peut être contrôlée graduellement.
- Quand la voiture est à l'arrêt ou au stop, le moteur électrique peut être arrêté complètement supprimant alors toute consommation d'énergie.
- En cas de freinage ou décélération, le moteur peut devenir un générateur électrique pour recharger les batteries.

Inconvénients du moteur électrique par rapport au moteur thermique

- La marche arrière est gérée par voie électronique et non pas par une boîte mécanique. Contrairement à la boîte de vitesse mécanique des véhicules conventionnels, le système électronique ne comporte pas de limitation intrinsèque de vitesse en marche arrière.

3.4 LE SYSTEME DE FREINAGE

Le système de freinage est différent de celui des véhicules conventionnels, la connexion entre la pédale de frein et le frein étant assurée par un circuit électrique.

En freinage, le moteur électrique fonctionne comme un générateur électrique pour récupérer et convertir l'énergie cinétique en électricité et la stocker dans les batteries.

Les véhicules électriques peuvent être équipés de trois systèmes de freinage (SF) simultanément :

- SF1 : freinage par récupération d'énergie,
- SF2 : freinage électro-hydraulique (système mécanique conventionnel),
- SF3 : freinage électrique (système de freinage par câblage).

Trois phases de freinage sont envisagées pour les véhicules électriques :

- si le conducteur relâche l'accélérateur, le système de contrôle activera une régénération légère par le SF1. Dans ce cas la vitesse du véhicule diminue légèrement ;

- si le conducteur appuie légèrement sur la pédale de frein ou si l'accélérateur est relâché soudainement, le système de contrôle activera une régénération plus importante ou complète par le SF1. Dans ce cas la vitesse du véhicule diminue nettement ;
- si le conducteur appuie fortement sur la pédale de frein, le système de contrôle activera tous les systèmes de freinage du SF1 au SF3. La régénération par SF1 fonctionne en plein régime. Celui-ci assiste simplement les systèmes de freinage par friction.

Néanmoins, ce principe n'est pas appliqué actuellement par tous les constructeurs.

3.5 LES EQUIPEMENTS ELECTRONIQUES ET LE SYSTEME DE CONTROLE

- **Le système de contrôle général du véhicule**

Le système de contrôle général du véhicule permet d'optimiser la performance du véhicule et la consommation d'énergie en harmonisant le fonctionnement des différents sous-systèmes contrôlés par des modules de contrôle spécifiques, tels que le module de contrôle du moteur électrique, du moteur thermique à combustion interne, etc. L'accélérateur, le freinage et certaines autres fonctions du véhicule sont également contrôlés par ce système de contrôle général.

- **Le système de contrôle de batterie BMS (Battery Management System)**

Le BMS est un système électronique gérant le fonctionnement des batteries (gestion de l'état de charge, répartition des charges entre les cellules, tension, température...).

Le BMS constitue ainsi un élément essentiel du véhicule, assurant à la fois des fonctions opérationnelles nécessaires aux échanges d'information utiles à la conduite (par exemple l'affichage de l'autonomie résiduelle) mais aussi d'autres fonctions qui ont un rapport plus ou moins étroit avec la gestion de la sécurité de la batterie et/ou du véhicule.

On peut considérer que le BMS répond à trois types d'objectifs:

- a. empêcher l'endommagement des éléments de batteries et du pack batteries,
- b. prolonger la durée de vie de la batterie en optimisant son fonctionnement (charge, décharge, ...),
- c. maintenir l'état du pack batterie en condition opérationnelle.

L'atteinte de ces objectifs qui contribue à la gestion de la sécurité de la batterie et du VE, est obtenue par diverses fonctions spécialisées telles que :

- protection des éléments contre leur fonctionnement hors plages de sécurité (température, tension...),
- contrôle de la charge,
- gestion de la sollicitation (appel de puissance, utilisation de techniques d'économie d'énergie, prolongement du temps entre deux charges...),

- détermination de l'état de charge (SOC) (information au conducteur, mais aussi information potentiellement exploitable en contrôle de procédure de charge),
- détermination de l' « état de santé » (SOH) de la batterie : il s'agit de la capacité résiduelle de la batterie à délivrer sa puissance nominale (indicateur de vieillissement de la batterie, mais aussi facteur déterminant pour évaluer la disponibilité en puissance pour les situations d'urgence),
- équilibrage électronique des éléments (les tolérances de fabrication sur les éléments nécessitent en pratique des fonctions d'équilibrage des appels de courant en fonction de leurs caractéristiques propres),
- autres fonctions telles que celles liées à l'identification et à l'authentification des caractéristiques de la batterie, des fonctions de communication, de la surveillance et de l'enregistrement du « vécu » de la batterie au cours de sa vie (*Log book function*).

Ces fonctions se déclinent différemment selon les usages de la batterie. A titre d'exemple, il est commode pour une batterie de VE de traduire l'état de charge (SOC) en prédiction d'autonomie résiduelle exprimée en kilomètres renvoyée sous forme d'indication sur un indicateur pour le conducteur.

Un pack batterie peut nécessiter une architecture de BMS relativement complexe et comprend des éléments intégrés au pack batteries et d'autres éventuellement délocalisés ailleurs dans le véhicule .A titre d'exemple, la figure 6 donne une vision conceptuelle d'un BMS pour application VE avec ses principaux réseaux de communication et périphériques mis en œuvre participant à la gestion de l'énergie (produite, utilisée) dans le véhicule.

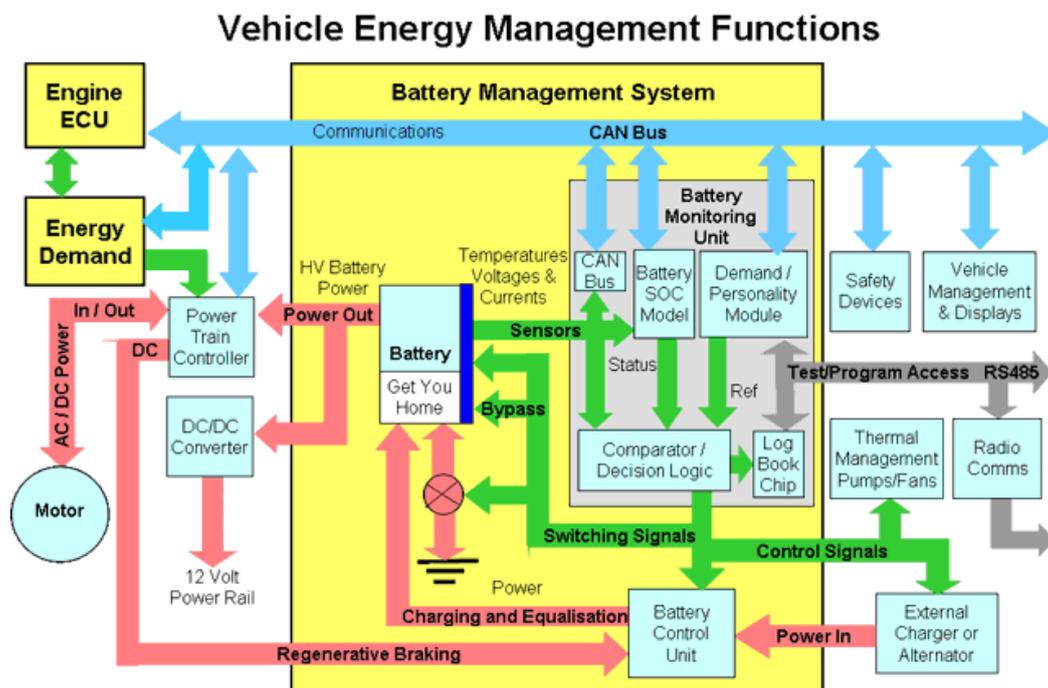


Figure 5 : BMS pour application automobile et lien avec les fonctions de gestion de l'énergie dans le véhicule électrique [9]

3.6 LES INFRASTRUCTURES DE RECHARGE DES BATTERIES

Etant donnée l'autonomie limitée du VE, le succès du déploiement reposera notamment sur la qualité des infrastructures de charge en termes de disponibilité et d'interopérabilité mais aussi sur la garantie de leur utilisation en parfaite sécurité.

Aujourd'hui, trois systèmes d'approvisionnement en énergie sont principalement envisagés :

- Une charge « normale » (dite aussi « lente »), qui représentera selon les estimations 90 à 95% des opérations. La puissance d'appel est de l'ordre de 3,5 kW pour une durée de charge de 5 à 8 h. Les dispositifs mis en œuvre (bornes de charge voire simple prise de courant 16 A) sont ceux qui seront principalement utilisés chez les particuliers avec ou sans adaptation.
- Des charges d'appoint en régime dit 'accélééré' (22 kW pour une recharge durant environ 1h) voire « rapide » (43 kW pour une durée de charge d'environ 30 mn) sont également envisagées en fonction de l'utilisation des VE.
- Un autre modèle envisagé passe par des échanges rapides de batteries dans des stations dédiées. L'objectif est de se rapprocher des contraintes habituelles d'approvisionnement en énergie des véhicules thermiques (stations services délivrant des carburants).

Les 4 différents modes de charge possibles tels que définis dans la norme NF EN 61851-1 sont décrits en détail dans le rapport couvrant le volet réglementaire et normatif [10]. On peut signaler de premières expérimentations de charge sans fils par induction [11].

Les dispositifs destinés à l'approvisionnement des batteries seront donc beaucoup plus nombreux que dans le cas des véhicules conventionnels et seront situés dans des emplacements très variés :

- dans les stations services traditionnelles,
- dans les garages ou parkings privés des particuliers,
- dans les parkings publics,
- dans des lieux de charge dédiés, potentiellement accessibles sur la voie publique,
- dans les parkings d'entreprises...