

# **Stockage d'Énergie Électrique et Perspectives de l'Électrification**

Version Initiale

**ABDERRAHMANE HAMMAR**

# Stockage d'Énergie Électrique et Perspectives de l'Électrification



# Stockage d'Énergie Électrique et Perspectives de l'Électrification

Abderrahmane HAMMAR

Auteur : Abderrahmane HAMMAR

ISBN : 9789403621197

© Abderrahmane HAMMAR

# Introduction générale

Je propose dans ce livre de consacrer plusieurs chapitres au système de stockage d'énergie électrique et aux différents éléments et fonctions indispensables à son fonctionnement. Le fil conducteur de cet ouvrage repose sur la notion d'électrode bloquante et électrode non bloquante. À partir de ces concepts, nous introduisons la notion de composant et la notion de système de stockage d'énergie électrique. En effet, les différents types de batteries, en particulier la batterie lithium et les supercondensateurs ainsi que des composants hybrides, mettent en œuvre des électrodes bloquantes et des électrodes non bloquantes.

Je tiens également à préciser que pour étayer ce travail et soutenir le fil conducteur de cet ouvrage et mettre en évidence les principaux éléments nécessaires pour les ingénieurs, j'ai ajouté quelques extraits de travaux avec leurs références. J'ai choisi de présenter cet ouvrage en chapitres, qui peuvent être utilisés, indépendamment les uns des autres. Pour cette raison quelques figures sont répétées.

Cet ouvrage est composé de cinq chapitres que j'ai choisi à les présenter comme des possible ouvrages indépendants : un premier chapitre d'introduction des composants de stockage d'énergie électrique, un deuxième chapitre illustrant les différentes fonctionnalités et fonctions d'un système de stockage d'énergie électrique. Le troisième chapitre est consacré aux systèmes de stockage d'énergie stationnaire souvent utilisés pour les énergies renouvelables, le quatrième chapitre introduit, le rôle des systèmes d'information dans l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie électrique, à travers un exemple de mobilité. Pour le cinquième et dernier chapitre, nous traçons les perspectives de l'électrification, là aussi par le biais d'un exemple de diffusion des systèmes électriques dans le domaine du machinisme agricole.

Après une introduction générale sur les composants de stockage d'énergie électrique, nous consacrons le premier chapitre aux principaux composants récents : la batterie lithium, le supercondensateur et les composants hybrides. Nous nous attardons sur la définition d'une structure poreuse et à ses conséquences sur notre classification des composants de stockage d'énergie électrique. Nous définissons le stockage d'énergie électrique sous forme électrostatique et sous forme électrochimique, et à chaque forme de stockage, nous associons des batteries et des supercondensateurs. Nous distinguons également des composants pour des applications nécessitant un niveau de puissance élevé et des composants nécessitant une densité d'énergie élevée. À la fin de ce premier chapitre, nous donnons quelques clés pour comprendre comment associer et équilibrer les systèmes de stockage d'énergie électrique mettant en jeu des quantités de composants élémentaires (cellules) très importantes.

Afin d'expliquer les différentes fonctions que pourrait assurer un système de stockage d'énergie électrique, pour des applications, type véhicules électriques et systèmes de stockage stationnaire pour réseaux électriques, nous avons choisi un formalisme qui ressemble à une analyse fonctionnelle. Néanmoins, cette analyse n'est qu'un choix de mise en forme de ce chapitre, indépendamment d'une analyse fonctionnelle dédiée à une application bien spécifique. Cette étude générique des différentes fonctions nous permet par la suite d'énumérer les différents risques associés aux composants et aux systèmes de stockage d'énergie électrique. Ces risques sont de natures électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Pour y remédier, nous proposons quelques mesures de sécurité et de protection que l'on trouve souvent en industrie.

Lors de mes différentes expériences en industrie, j'ai constaté la présence d'une certaine documentation sur les systèmes de stockage d'énergie pour les applications mobiles (stockage embarqué) qui contraste avec la rareté que j'ai observée pour les applications stationnaires. En conséquence, dans le troisième chapitre nous pouvons trouver des éléments de base, voire des éléments clés pour ce type d'applications. Nous aurons une vue d'ensemble des différentes applications stationnaires et le rôle du système de

stockage d'énergie. Nous détaillons les fonctions associées à une unité d'énergie (Distributed Energy Resource (DER). Nous traitons également du rôle de chaque système de la DER.

Dans le quatrième chapitre, nous montrons à travers un exemple le rôle que peuvent jouer les nouvelles technologies de l'information dans l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie électrique dans les systèmes mobiles et les systèmes stationnaires. Pour ces derniers ayant proposé un aperçu du rôle de ces systèmes pour le diagnostic et les mises à jour des logiciels, etc. au chapitre 3, notre exemple traite ici des systèmes d'information et de leur rôle dans la mobilité, en particulier pour des flottes de véhicules. Nous discutons du cas d'usage lié à la recharge sans contact pour les véhicules électriques utilisés dans les systèmes autonomes.

L'électrification dans le domaine de la mobilité suscite beaucoup d'intérêt, car cela peut aider à améliorer la situation de la pollution urbaine voire la réduction de la pollution d'une manière générale. Néanmoins, la pénétration de cette technologie est parsemée de beaucoup d'obstacles et influencée par différents facteurs ; certains de ces facteurs aident à cette introduction quand d'autres représentent des obstacles à sa pénétration dans le marché. Ces facteurs sont de natures différentes, ils sont économiques, sociaux, technologiques, etc. Le cinquième et dernier chapitre nous permet d'analyser ces différents facteurs et obstacles et de nous interroger sur la manière d'imaginer l'électrification et l'hybridation pour les années à venir en prenant comme exemple le domaine du machinisme agricole et en particulier celui des tracteurs agricoles. Certes, de nombreux éléments les différencient des applications dites « on-road », mais nous pouvons facilement constater des ressemblances. D'autre part, les applications « off-road » sont intéressantes car elles montrent plus de diversité d'applications que les véhicules mobiles destinés au transport des personnes. Les applications automotives par exemple sont l'objet de différentes publications de fabricants de voitures et organismes, ce qui n'est pas vraiment le cas pour les applications « off-road ».

# Chapitres

- 
- 1 Stockage d'énergie électrique**
  - 2 Fonctionnalités du système de stockage d'énergie électrique**
  - 3 Stockage d'énergie électrique pour applications stationnaires**
  - 4 L'Electrification et les nouveaux systèmes d'information**
  - 5 Perspectives de l'électrification**
-

AH

# Stockage d'Énergie Électrique

# Table des matières

<b>1 Stockage d'énergie électrique</b>	<b>1—9</b>
<b>1.1 Stockage d'énergie électrique: principe</b>	<b>1—9</b>
1.1.1 Généralités sur les composants de stockage d'énergie électrique	1—11
1.1.2 Stockage électrique : électrodes principe de fonctionnement	1—14
1.1.2.1 Structure poreuse	1—15
1.1.2.2 Stockage électrostatique (d'électrodes bloquantes)	1—22
1.1.2.2.1 Le supercondensateur	1—22
1.1.2.2.1.1 Forme géométrique des cellules ou composant élémentaire	1—27
1.1.2.2.1.2 Applications des supercondensateurs	1—29
1.1.2.2.1.3 Équilibrage des cellules des supercondensateurs	1—31
1.1.2.2.2 Les composants hybrides [Karel]	1—36
1.1.2.2.3 Durée de vie et nombre de cycles	1—40
1.1.2.3 Stockage et génération électrique : électrodes non bloquantes (stockage électrochimique)	1—44
1.1.2.3.1 La batterie électrochimique	1—44
1.1.2.3.1.1 Introduction batterie lithium [RECHARGE]	1—44
1.1.2.3.1.2 Structure et principe de fonctionnement de la batterie au lithium-ion [Magnet]	1—47
1.1.2.3.1.3 Principe de la conduction électronique et ionique pour les batteries Li [Arnaud]	1—47
1.1.2.3.1.4 Classification de la batterie au lithium-ion [Magnet]	1—49
1.1.2.3.1.5 Forme géométrique de la cellule élémentaire d'une batterie à base de Lithium	1—50
1.1.2.3.1.6 Puissance versus Energie	1—53
1.1.2.3.1.7 Batteries pour des application d'énergie	1—55
1.1.2.3.1.8 Batterie pour les applications de puissance	1—59
1.1.2.3.1.9 Durée de vie et nombre de cycles	1—61
1.1.2.3.1.10 Techniques d'équilibrage des différentes branches d'un système de batterie	1—65
1.1.2.3.1.11 Technique d'équilibrage entre cellules (cf. chapitre Supercondensateurs)	1—70
1.1.2.3.2 Annexe : La pile à combustible (génération) [pairform]	1—71
1.1.2.3.2.1 Fonctionnement chimique d'une cellule élémentaire à combustible	1—71
1.1.2.3.2.2 Le système Pile	1—72
<b>1.2 Références</b>	<b>1—73</b>
<b>1.3 Liste des figures et des Tableaux</b>	<b>1—75</b>

# 1 Stockage d'énergie électrique

## 1.1 Stockage d'énergie électrique: principe

Différentes technologies et techniques sont susceptibles de répandre et rendre maîtrisables des solutions de stockage et de génération de l'énergie, en particulier pour le stockage de l'énergie électrique. La figure 1.1 nous donne quelques orientations sur ce type de systèmes ; ils diffèrent par la nature des principes physiques/chimiques utilisés pour assurer le stockage. Sans chercher à être exhaustif, on peut distinguer des systèmes de stockage de nature chimique, mécanique et/ou thermique. Néanmoins, pour le présent document nous consacrons ce travail et ce chapitre au stockage d'énergie électrique par des systèmes et des composants de stockage électriques mettant en œuvre des phénomènes électrochimiques et électrostatiques. Ce type de stockage (nous pouvons aussi parler dans certains cas de génération de l'énergie électrique) est souvent utilisé, **d'une part, dans différentes applications de mobilité (en embarqué)** telles que dans l'automotive (voiture tout électrique et voiture hybride, bus électrique et hybride, camion, tracteur...), le rail (tramway sans caténaire, train hybride), l'aéronautique, les applications marines **et d'autre part, dans des applications stationnaires** comme dans le cas de la valorisation des énergies renouvelables et/ou pour « renforcer » les réseaux électriques industriels. Nous reviendrons sur ces applications dans le chapitre dédié aux applications du stockage d'énergie électrique.

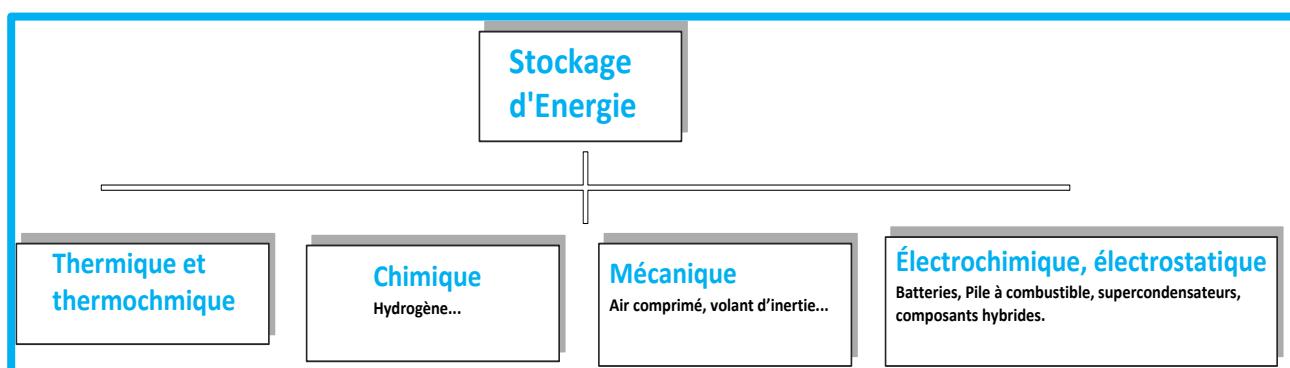


Figure 1.1 Technologies et techniques de stockage d'énergie

En général, les systèmes de stockage d'énergie électrique sont composés de plusieurs éléments et sous-systèmes assurant la sécurité du système et des utilisateurs, néanmoins l'élément principal de ces systèmes reste le composant élémentaire de stockage d'énergie souvent associé à la notion de cellule élémentaire. Les cellules sont souvent associées électriquement et assemblées mécaniquement pour former des modules ou stacks élémentaires. Les modules à leur tour peuvent être utilisés en série et/ou en parallèle pour former des packs, des branches ou des armoires pour atteindre des niveaux d'énergies et de puissances souhaitées. À chaque niveau d'intégration, des éléments de sécurité, de contrôle et de monitoring sont prévus pour le bon fonctionnement du système de stockage d'énergie dans son environnement applicatif (cf. fig. 1.2, 1.3) tout en assurant une sécurité optimale ; la sécurité est l'élément primordial pour la pénétration du marché de ces systèmes en dehors des aspects économiques. Les systèmes de stockage d'énergie peuvent être des systèmes destinés à des applications de puissance ou des systèmes pour des applications d'énergie. Des cas d'hybridation électrique entre systèmes de puissance et systèmes d'énergie existent également. Cette hybridation permet de jumeler leurs performances spécifiques afin de répondre aux besoins de l'utilisateur. L'exemple proposé dans la figure 1.2 illustre la relation entre le Système Batterie (Battery Energy Storage System BESS) et l'élément de base du stockage, en l'occurrence la cellule élémentaire ; en effet ce pack destiné à la voiture tout électrique (RENAULT ZOE) a pour but d'alimenter le véhicule lors de son utilisation et de permettre de stocker l'électricité lors de la recharge sur un réseau local ou public. Ce pack est doté d'un superviseur (Battery management System) et d'un système de management thermique. En revanche, la figure 1.3

représente la relation entre le Système Batterie (BESS) d'une application stationnaire et la cellule ainsi que les différentes étapes intermédiaires d'intégration du système. Ce sujet sera détaillé dans d'autres chapitres de ce livre.

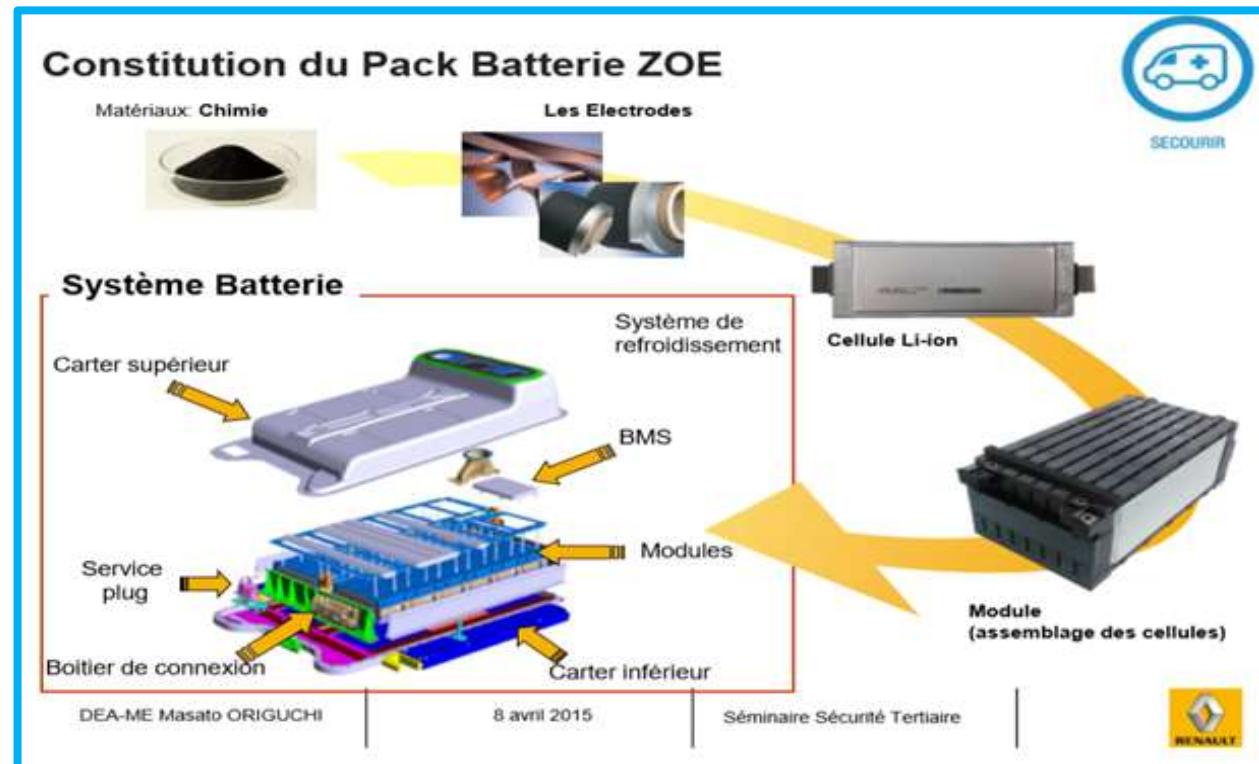


Figure 1.2 Principe de constitution d'un système batterie pour une application mobile

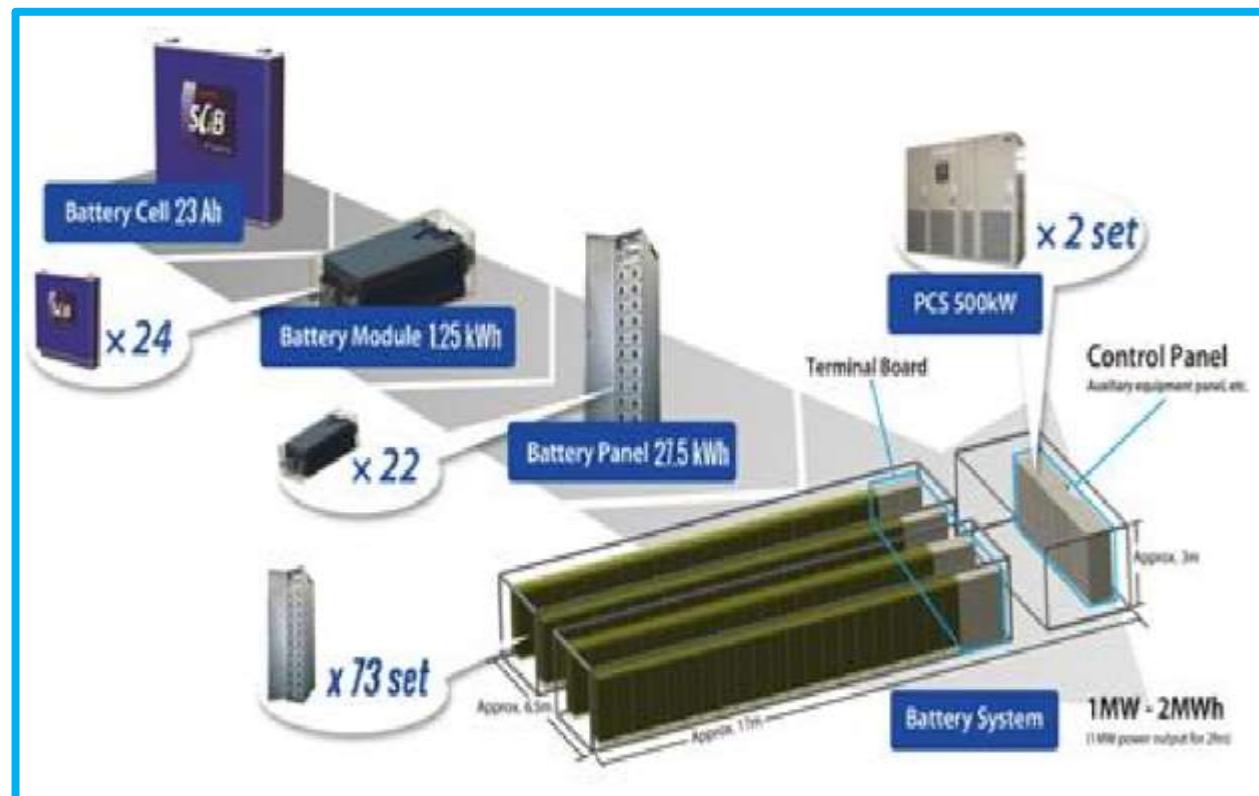


Figure 1.3 Relation entre les cellules, les modules, les armoires et le système batterie stationnaire  
[Toshiba, Business & Technology Report Updated April 2019]

### 1.1.1 Généralités sur les composants de stockage d'énergie électrique

Un composant de stockage d'énergie électrique (souvent, on parle de cellule) est une unité élémentaire de stockage d'énergie électrique (cf. fig. 1.4). Il est constitué de **deux électrodes** (anode et cathode), **d'un séparateur** qui isole les deux polarités et qui permettra ainsi d'éviter tout court-circuit entre les deux pôles, **d'un électrolyte** permettant la conduction ionique, **d'ions** et **de collecteurs de courant**; **les collecteurs de courant métalliques doivent posséder des conductivités électriques élevées**. *L'aluminium, le cuivre et l'acier inoxydable sont utilisés.* Néanmoins *leur poids pénalise la densité de l'énergie et la densité de puissance*. Il est à noter que les électrons sont apportés par la charge ou la génération de l'électricité par une source extérieure.

Le principe de stockage d'énergie peut être electrochimique ou électrostatique et, dans d'autres cas, hybride, mais dominé par l'aspect électrostatique. Nous pouvons également parler de stockage d'énergie mettant en œuvre deux conducteurs l'un ionique et l'autre électronique ; c'est à l'interface entre ces deux conducteurs que le stockage électrique se produit électro-chimiquement ou électro-statiquement.

En effet, nous pouvons distinguer deux types de stockage de l'énergie électrique ; un stockage/génération electrochimique (batteries electrochimiques, pile à combustible...) et un stockage électrostatique (supercondensateurs et composants hybrides). Pour le cas electrochimique, **des électrodes non bloquantes (processus faradiques)** sont utilisées ; des réactions d'oxydoréduction interviennent dans le processus de stockage en plus de l'adsorption des ions de l'électrolyte à la surface des électrodes, plusieurs oxydes de métaux peuvent être utilisés pour les électrodes, mais cela conduit à un coût d'électrode élevé et à une cyclabilité relativement faible due à la modification chimique des électrodes. En revanche, le stockage électrostatique est basé sur l'utilisation **d'électrodes dites bloquantes (processus non faradiques)** : le principe consiste à supprimer toute réaction electrochimique à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte, le stockage se fait d'une manière électrostatique sous forme de capacités formées à l'interface entre un conducteur ionique « électrolyte » et un conducteur électronique « l'électrode ». Évidemment, tout ce processus se déroule à des échelles microscopiques.

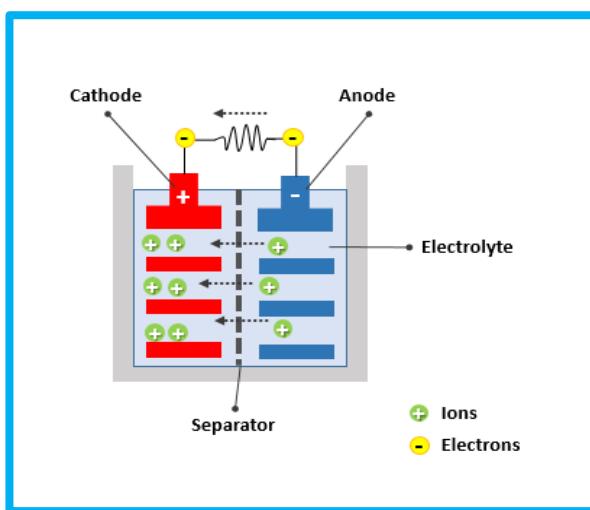


Figure 1.4 Schéma de principe général d'une unité de stockage d'énergie électrique

*Selon [GODILLOT] : « Les processus faradiques convertissent l'énergie électrique sous forme chimique, par l'intermédiaire de la transformation électrochimique des matériaux d'électrode. La quantité de charges stockées est conditionnée par la quantité de matière électro-chimiquement active. En revanche, les processus non faradiques, ou capacitifs, reposent entièrement sur le stockage électrostatique de charges à*

*la surface des électrodes (accumulation de charges), sans transformations chimiques ou électrochimiques. La quantité de charges stockées dépend de la tension appliquée.»*

Aujourd’hui, les performances du stockage de l’énergie électrique s’améliorent constamment comme le montre le diagramme de Ragone des [figures 1.5 et 1.6](#), classifiant les différents types de technologie en fonction du compromis puissance/énergie. Avec les derniers développements des composants électrochimiques à base de lithium, un pas intermédiaire est en train d’être franchi afin de répondre aux différents besoins et contraintes que certaines applications imposent. Le lithium permet d’atteindre des densités d’énergie intéressante et se positionne actuellement en pole position en termes de densité d’énergie massique et volumique. En effet, le lithium, élément le plus petit et le plus léger de tous les métaux. Dans le tableau de Mendeleïev, c’est un élément solide métallique et alcalin. Il dispose des propriétés électrochimiques excellentes par rapport à son poids ( $\pm 2$  fois celle du Ni/Cd).

En revanche, les supercondensateurs demeurent les plus adaptés pour les applications nécessitant des densités de puissance élevées.

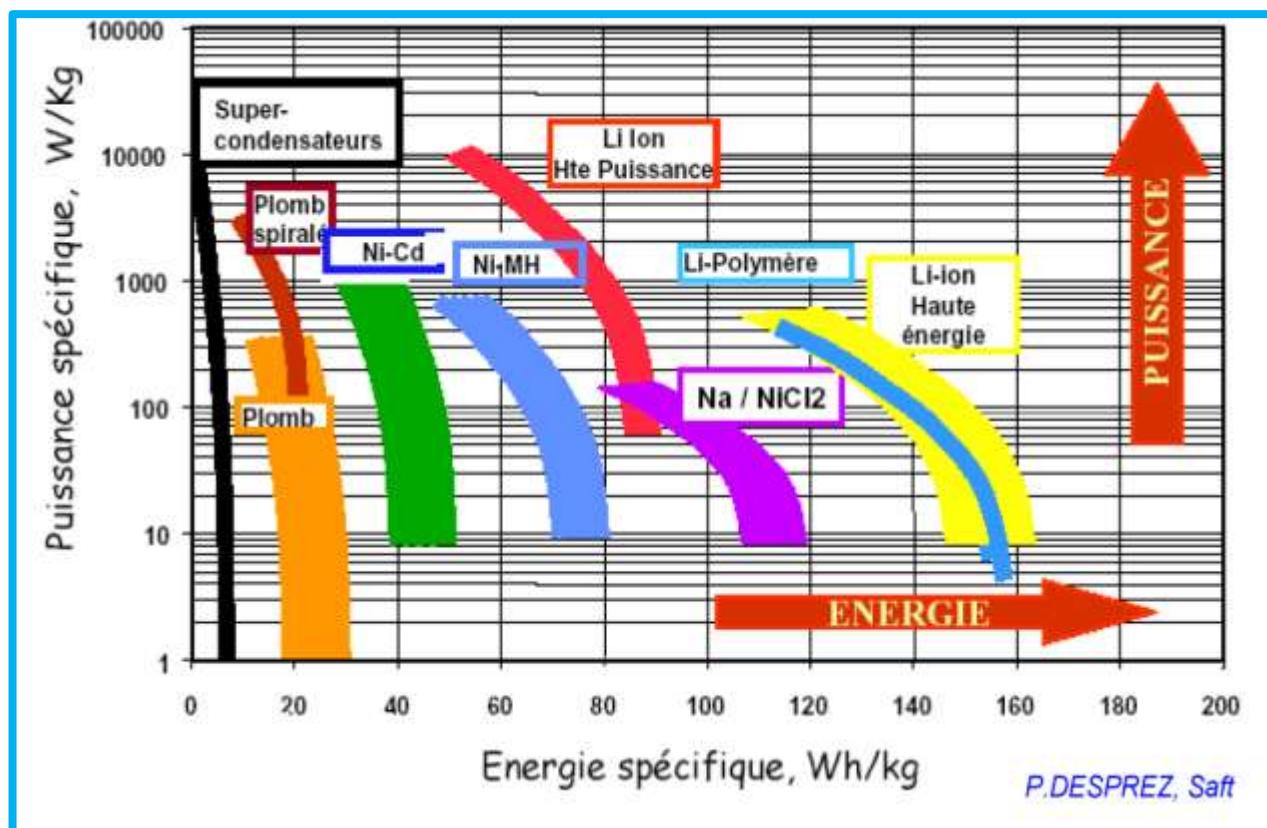


Figure 1.5 Diagramme de Ragone des accumulateurs électrochimiques : comparaison puissance et énergie massiques

Les marchés les plus demandeurs de systèmes de stockage d’énergie électrique concernent les systèmes autonomes allant des systèmes électroniques portables (nouvelles fonctions liées au nomadisme comme le téléphone, l’ordinateur...) jusqu’aux systèmes de transport et stockage stationnaire à haute énergie et puissance. La [figure 1.7](#) résume des exemples d’utilisation et d’intégration des systèmes de stockage d’énergie électrique dans le paysage énergétique global.

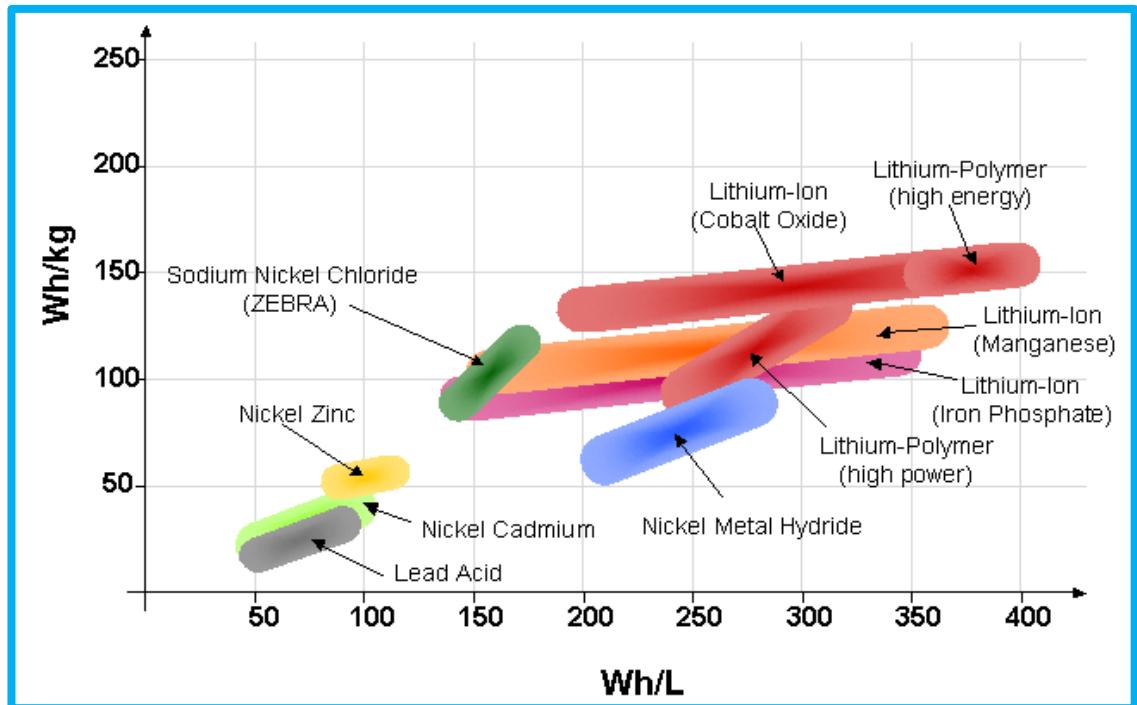


Figure 1.6 Performances des différentes technologies de stockage électrique [Doerffel]



Figure 1.7 Mutation des réseaux vers une production plus décentralisée exploitant davantage les ressources renouvelables et les moyens de stockage (les réseaux de transport, de répartition et de distribution n'ont pas été distingués) [Mulon]

### 1.1.2 Stockage électrique : électrodes principe de fonctionnement

Comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe précédent, une unité élémentaire de stockage d'énergie électrique ([cf. fig. 1.4](#)) est constituée de deux électrodes (anode et cathode), d'un séparateur qui isole les deux polarités — et qui permettra ainsi d'éviter tout court-circuit entre les deux pôles —, d'un électrolyte permettant la conduction ionique, d'ions et de collecteurs de courant. Les électrons sont apportés par la charge ou la génération de l'électricité par une source extérieure. Il est à noter que les électrodes représentent l'élément principal pour l'énergie stockée, car elle doit avoir des caractéristiques spéciales telles qu'une grande surface spécifique (*c'est la surface développée de 1 g de matière en m<sup>2</sup>, par exemple la surface spécifique du charbon actif est de 2000 m<sup>2</sup>/1 g*). Dans les prochains paragraphes, nous parlerons plus longuement de cet élément en montrant son comportement pour le stockage de l'énergie avec un focus sur son comportement macroscopique et purement électrique. En effet souvent l'électrode est définie comme un élément capable de céder ou de capter les électrons.

Nous pouvons distinguer deux types d'électrodes utilisées dans les composants de stockage d'énergie électrique : les électrodes bloquantes (Homogenous Electrodes) mettant en œuvre un processus dit non faradique, et des électrodes non bloquantes (no-Homogeneous electrodes) mettant en œuvre un processus faradique.

En d'autres termes nous pouvons définir ces deux types d'électrodes comme suit :

Les électrodes bloquantes (Homogenous Electrodes) sont des électrodes destinées à un stockage dit électrostatique. Dans ce type d'électrodes, le principe de stockage d'énergie consiste à éviter toute réaction électrochimique à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte. Le stockage se fait de manière électrostatique sous forme de capacité formée par un conducteur ionique « électrolyte » et un conducteur électronique « l'électrode ». Nous pouvons également parler d'un processus non faradique, et ce malgré l'accroissement de la tension. La tension maximale est limitée par les potentiels d'oxydation et de réduction de l'électrolyte et/ou la corrosion des collecteurs de courants.

Les électrodes non bloquantes (no-Homogeneous) sont des électrodes destinées à un stockage électrochimique. Lorsque des électrodes non bloquantes sont utilisées, des réactions d'oxydoréduction interviennent dans le processus de stockage en plus de l'adsorption des ions de l'électrolyte à la surface. Plusieurs oxydes de métaux peuvent être utilisés, mais cela conduit à un coût d'électrode élevé et à une cyclabilité relativement faible due à la modification chimique des électrodes. On peut qualifier ce processus de processus faradique.

Pour rappel, selon [GODILLOT] : « Les processus faradiques convertissent l'énergie électrique sous forme chimique, via la transformation électrochimique des matériaux d'électrode. La quantité de charges stockées est conditionnée par la quantité de matière électro-chimiquement active. En revanche, les processus non faradiques, ou capacitifs, reposent entièrement sur le stockage électrostatique de charges à la surface des électrodes (accumulation de charges), sans transformations chimiques ou électrochimiques. La quantité de charges stockées dépend de la tension appliquée. »

Différents phénomènes se superposent lors d'un processus de stockage ou de restitution de l'énergie électrique par les composants de stockage électrique. Nous pouvons citer les différents phénomènes liés à la dispersion des accessibilités à l'intérieur des différents pores de l'électrode, par exemple les pores de taille souvent différente. De plus, pour les mêmes pores, cette accessibilité diffère selon la profondeur et la forme des pores à l'échelle microscopique. Nous introduisons ici deux notions qui sont importantes à comprendre : **la dispersion dite fréquentielle (profondeur à l'intérieur des pores d'une même taille)** et **la dispersion due aux différentes accessibilités (différentes pénétrabilités du couple**

AH

# Fonctionnalités du Système de Stockage d'Énergie Électrique

## Table des matières

<b>2 Fonctionnalités du système de stockage d'énergie électrique .....</b>	<b>2—3</b>
<b>2.1 Détermination des fonctionnalités du système de stockage d'énergie électrique .....</b>	<b>2—3</b>
<b>2.2 Le scope de l'étude des fonctionnalités des systèmes de stockage d'énergie électrique.....</b>	<b>2—5</b>
2.2.1 Les phases de vie d'un système de stockage d'énergie électrique .....	2—8
2.2.2 Les éléments du milieu extérieur (environnement) .....	2—11
<b>2.3 Risques et fonctions principales de sécurité .....</b>	<b>2—14</b>
2.3.1 Dangers électriques .....	2—14
2.3.2 Risques mécaniques .....	2—16
2.3.3 Dangers chimiques .....	2—17
2.3.4 Emballement thermique dû aux risques mécaniques/électriques et électrochimiques .....	2—18
2.3.5 Autres risques et mesures de sécurité .....	2—20
<b>2.4 Techniques et principes assurant la sécurité fonctionnelle d'un système de stockage d'énergie électrique.....</b>	<b>2—22</b>
2.4.1.1 Mesures contre les risques électriques .....	2—22
2.4.1.2 Mesures contre les risques thermiques et les risques chimiques .....	2—24
<b>2.5 Représentation graphique des différentes fonctions.....</b>	<b>2—28</b>
<b>2.6 Références .....</b>	<b>2—39</b>
<b>2.7 Liste des figures et des Tableaux .....</b>	<b>2—39</b>

## 2 Fonctionnalités du système de stockage d'énergie électrique

### 2.1 Détermination des fonctionnalités du système de stockage d'énergie électrique

Afin d'expliquer les différentes fonctions que pourrait assurer un système de stockage d'énergie électrique « pour des applications type véhicules électriques et systèmes de stockage stationnaire pour réseaux électriques », nous avons choisi un formalisme qui ressemble à une analyse fonctionnelle externe. Néanmoins cet objectif n'est qu'une mise en forme de ce chapitre, indépendamment d'une analyse fonctionnelle dédiée à une application bien spécifique.

En effet, la fonction principale d'un système de stockage d'énergie embarquée ou stationnaire est de réaliser le stockage et la restitution de l'énergie électrique.

Dans le cas des applications stationnaires comme dans le cas des énergies renouvelables ou en soutien aux réseaux électriques, le système de stockage d'énergie stocke l'énergie provenant des ENR (Énergies renouvelables) et/ou du réseau, et la restitue au réseau ou aux consommateurs selon une stratégie définie et selon l'intérêt économique défini pour ce système mais aussi d'après le niveau défini ([cf. figure 2.1](#)).

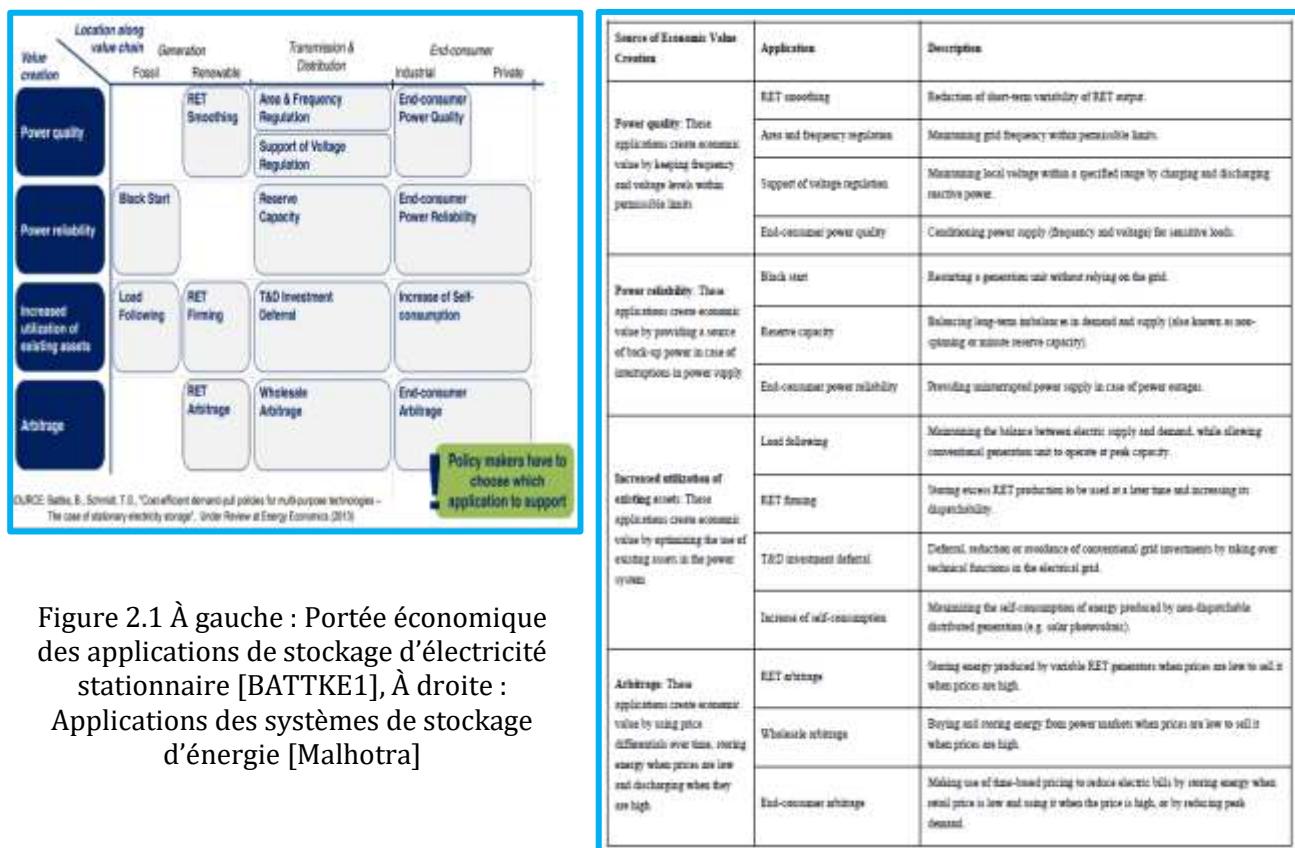


Figure 2.1 À gauche : Portée économique des applications de stockage d'électricité stationnaire [BATTKE1], À droite : Applications des systèmes de stockage d'énergie [Malhotra]

Pour les applications mobiles de type automobile par exemple, l'énergie électrique provient du réseau électrique via un chargeur ou lors de la charge par récupération d'énergie ou encore par la charge par une autre source d'énergie embarquée (hybridation électrique ou thermique). Cette énergie est restituée aux consommateurs pour propulser ou aider à propulser le véhicule (boost). Le système de stockage d'énergie électrique peut également contribuer à l'optimisation de l'efficacité énergétique du véhicule pour alimenter des accessoires ou des outils connectés propres au véhicule comme dans les applications « off road » pour les secteurs des BTP et du machinisme agricole ([cf. figure 2.2 et 2.3](#)).

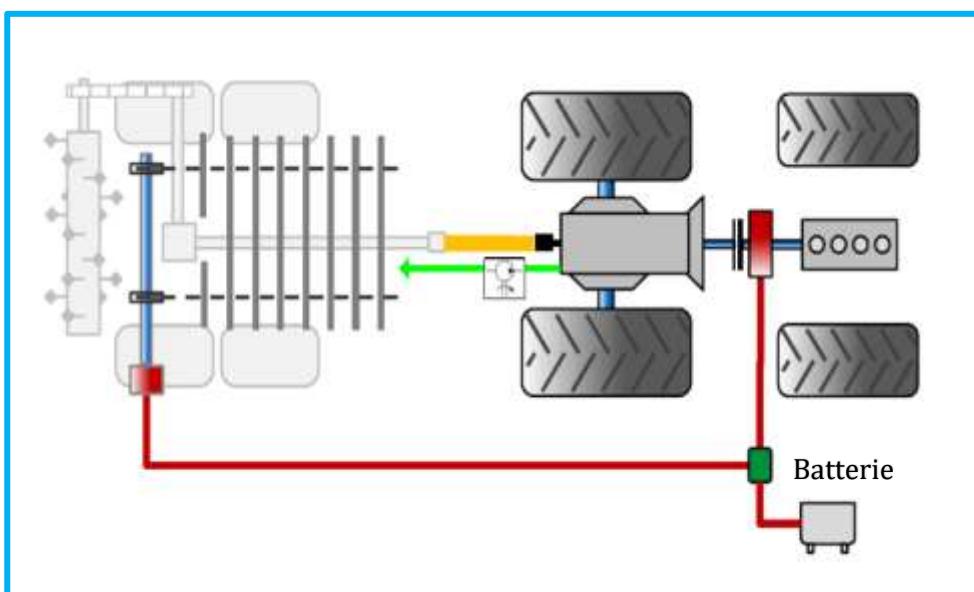
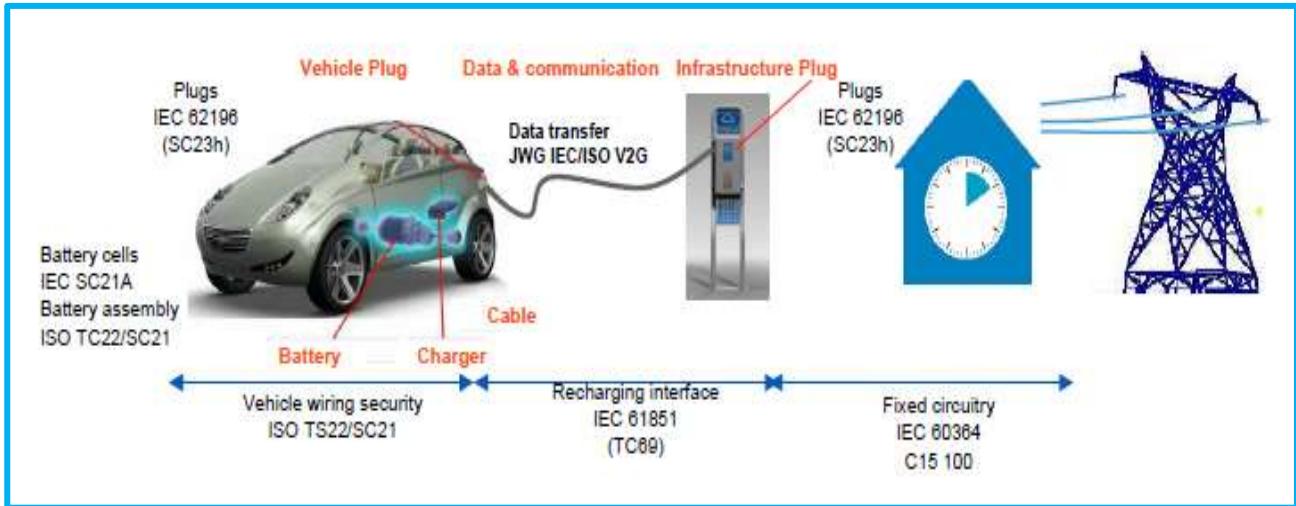


Figure 2.3 Système tracteur-outil hybride incluant un système de stockage d'énergie électrique

En résumé, voici comment nous pouvons définir la fonction d'un système de stockage d'énergie (cf. figure 2.4) :

- **à qui rend-il service ?** À l'utilisateur ou le client comme les utilisateurs de bus, pour les applications marines, pour les énergies renouvelables, les machines agricoles, les trains, etc. ;
- **sur quoi est-il efficace ?** Sur l'énergie fournie par le réseau par l'intermédiaire du chargeur ou de l'énergie récupérée lors des phases de freinage ou générée à partir d'une source thermique dans les systèmes hybrides ;
- **dans quel but ?** Stocker et restituer l'énergie électrique depuis et vers le consommateur (véhicule, réseau, outils). Dans le cas de la pile à combustible, cette fonction est très nuancée car elle peut fonctionner grâce à un système hybride électrique (pile à combustible + supercondensateur ou batterie de puissance).

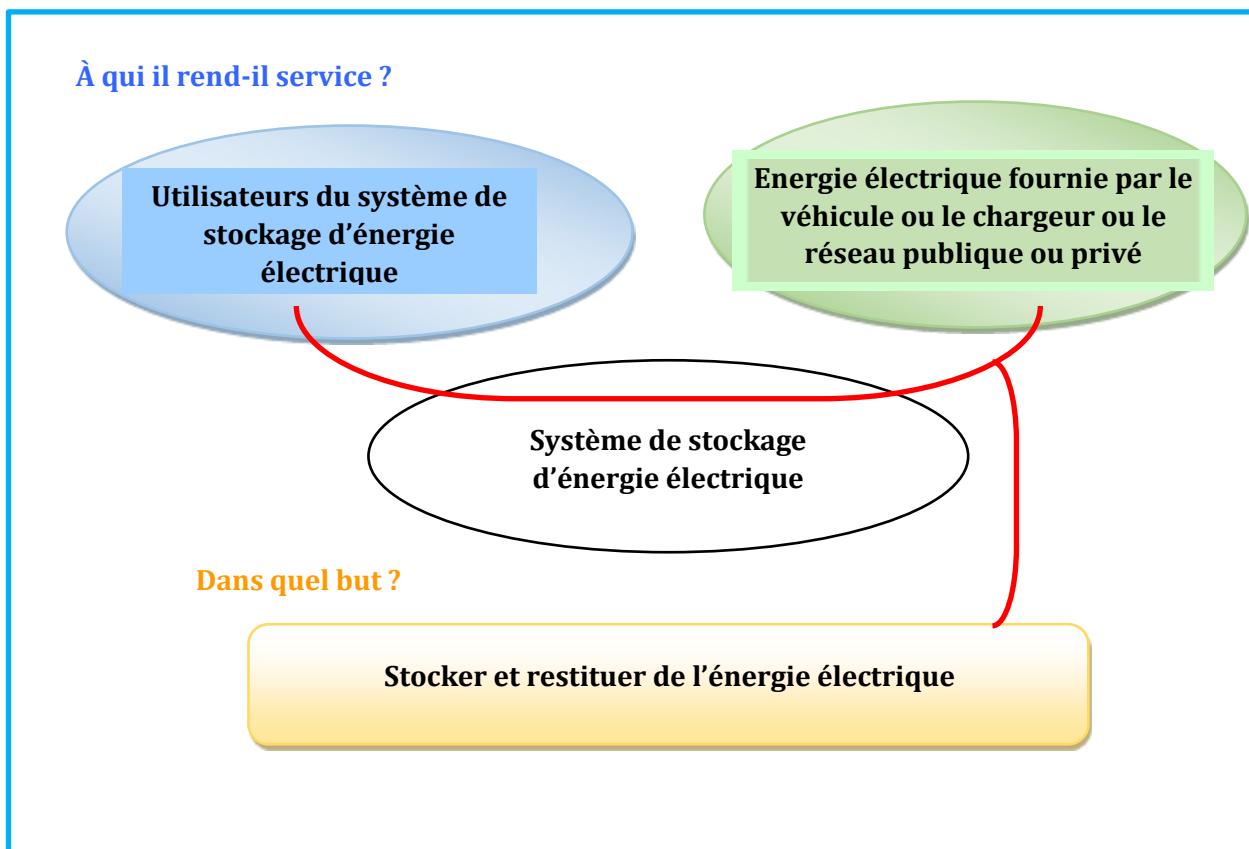


Figure 2.4 Fonction principale d'un système de stockage d'énergie électrique

## 2.2 Le scope de l'étude des fonctionnalités des systèmes de stockage d'énergie électrique

Les systèmes de stockage d'énergie électrique utilisent souvent des systèmes de batteries (Battery Energy Storage System : BESS) ou des supercondensateurs à double couche ou des composants hybrides (Supercapacitor Energy Storage System : SESS). Il est également possible d'être confronté à utiliser des systèmes de génération électrique par piles à combustible (Fuel cell). Dans ce paragraphe nous considérerons le traitement exclusivement de la fonction associée aux systèmes et composants de stockage d'énergie électrique avec des batteries et des supercondensateurs symétriques ou asymétriques (composants hybrides). Il est tout à fait clair que pour des systèmes électriques hybrides, batteries et supercondensateurs seront considérés comme deux systèmes séparés afin de simplifier la compréhension et l'étude.

Pour des applications de stockage d'énergie électrique embarquée ou stationnaire, deux voire trois approches se superposent pour répondre aux besoins de l'utilisateur et assurer les différentes fonctionnalités (cf. figures 2.5 et 2.6) :

- une approche composante qui traitera les différents aspects au niveau composant (souvent cellule) ; aspects électriques, mécaniques, de safety... ;
- une ou des approches intermédiaires mettant en œuvre les aspects de modularité (module, pack) et de branches rackées, voire des arrangements en armoire (cabinet, pack). Comme dans le cas du composant, les différents aspects électriques, mécaniques et de safety, entre autres, doivent être traités ;
- une approche système qui consiste à mettre un groupe de modules, ou d'armoires ensemble dans une configuration ou architecture adaptée, afin de répondre aux besoins finaux en termes d'énergie et de

AH

# Stockage d'Énergie Électrique pour applications stationnaires

# Table des matières

<b>3 Stockage d'énergie électrique pour applications stationnaires</b>	<b>3—5</b>
<b>3.1 Applications stationnaires de l'électrification dans les réseaux électriques et pour les énergies renouvelables</b>	<b>3—5</b>
3.1.2 Description générale	3—7
3.1.3 La fonction de stockage d'énergie électrique (Electrical Energy Storage System)	3—12
3.1.3.1 Description générale	3—12
3.1.4 Description détaillée du stockeur d'énergie électrique	3—17
3.1.4.1 Le Système de stockage d'énergie (ESS : Energy storage system ou BESS : Battery energy storage system, SESS Supercapacitor energy storage system))	3—17
3.1.4.2 Le système de contrôle et de commande	3—21
3.1.4.3 Autres Fonctions et systèmes	3—23
3.1.4.3.1 Les fonctions du système d'information : télémétrie et diagnostic	3—23
3.1.4.3.2 Management de la fonction « contrôle commande »	3—24
3.1.4.3.3 Détection d'incendie/de fumée	3—24
3.1.4.3.4 Arrêt d'urgence	3—26
3.1.4.3.5 Mesure d'isolement	3—27
3.1.4.3.6 Prise de terre	3—28
3.1.4.3.7 Pictogrammes	3—29
3.1.4.4 Autres fonctions liées au DER	3—30
3.1.4.4.1 Implantation du DER	3—30
3.1.4.4.2 Cheminement des câbles	3—31
3.1.4.4.3 Éclairage du site d'installation du ou des stockeurs d'énergies électriques	3—31
3.1.4.5 Gestion des risques dans les DER	3—32
3.1.4.6 Cycle de vie des batteries et des supercondensateurs pour un DER	3—36
3.1.4.7 Transport des batteries/superconducteurs	3—37
3.1.4.7.1 Transport de modules de batteries.	3—39
3.1.4.8 Entreposage	3—44
3.1.4.9 Production et mise en service	3—46
3.1.5 Interface de puissance	3—47
3.1.5.1 Description générale	3—47
3.1.5.2 Description détaillée	3—48
3.1.5.2.1 Conversion DC/DC	3—48
3.1.5.2.3 Isolation galvanique	3—54
<b>3.2 Références</b>	<b>3—57</b>
<b>3.3 Liste des figures et des tableaux</b>	<b>3—57</b>

## Terminologie

<b>Acronyme</b>	<b>Définition Blue-Solutions</b>
BESS/SESS	Battery/supercapacitor énergie storage system, correspondant à l'ensemble du système de stockage d'énergie par batteries/supercondensateurs avec tous les composants auxiliaires assurant son bon fonctionnement.
EMS	Energy management system, correspondant au système de contrôle/commande pilotant un ensemble de stockeurs, convertisseurs, etc.
ESS_MESA	Correspond au stockeur d'énergie, les éléments de conversion, d'isolation galvanique et de contrôle/commande associés (cf. MESA-BESS specification).
Stockeur Energy/Énergie	Le stockeur correspond au conteneur d'énergie permettant de répondre au besoin client en termes d'énergie et de puissance.
Rack/pack	Un ensemble de branches de batteries associées en parallèle et logées dans le même espace mécanique.
Rack mécanique	Un espace mécanique pour loger le pack et protéger un ensemble de branches associées en parallèle.
Branche (String)	Ensemble de modules de batteries associés en série pour atteindre la tension de fonctionnement.
Groupe	Un ensemble de racks LMP connectés au même convertisseur.
Contrôle/commande	Ensemble des fonctionnalités de <u>communication</u> , de <u>pilotage</u> , de <u>supervision</u> et de <u>mesure</u> .
Communication	La communication (communication) : consiste à faire un lien entre deux éléments permettant l'échange de données contribuant à réaliser les différentes fonctions du système (stocker et restituer l'énergie).
Pilotage	Le pilotage (control) : l'ensemble de consignes et d'actions contribuant à réaliser les différentes fonctions du système (stocker et restituer l'énergie).
Supervision	La supervision (monitoring) : consiste à surveiller, visualiser et enregistrer des données de plusieurs éléments assurant les différentes fonctions du système (stocker et restituer l'énergie).
Mesure	La mesure (measurement) : consiste à remonter des valeurs physiques qui sont utilisées pour la supervision, le pilotage par le biais de la communication ou d'un signal analogique.
Diagnostic	Ensemble de fonctions permettant de surveiller un stockeur d'énergie, par exemple, afin d'identifier la nature et la cause d'une défaillance au niveau d'un stockeur d'énergie (module, cellule, SCU,...).
Télémaintenance	Permet le contrôle à distance (du stockeur, par exemple) pour diagnostiquer, résoudre des défauts, maintenir à jour le système (soft).
Télémétrie	Permet la supervision à distance et la journalisation d'informations d'intérêt (par reporting) vers le concepteur du système (fabricants du système de stockage d'énergie) et/ou un opérateur (client, RTE par exemple).
Data logger (enregistreur de données)	Dispositif automatique, voire programmable, qui enregistre des valeurs de mesures individuelles et des séries de mesures sur une longue période (pouvant couvrir plusieurs mois). Les grandeurs sont automatiquement mesurées, souvent numérisées et enregistrées sur un support. Elles peuvent être transmises par le biais d'une interface à un afficheur, à un PC muni d'un logiciel (pour visualisation et analyse), à une imprimante ou à un téléphone intelligent (source Wikipédia).

DC	Direct current.
AC	Alternative current.
SCU	Strings control unit
SU Switching unit	Elle permet la connexion et la déconnexion de la branche au reste du système.
MGU	Master group unit : cette fonction permet le management d'un groupe dans le BESS.
Enveloppe	Terme générique pour désigner un shelter (conteneur), un bâtiment, une armoire...
<b>Acronyme</b>	<b>Définition selon MESA/IEC61850</b>
Battery Bank	A collection of battery cells which can be used to store energy. Connected to a single inverter. A bank may be a shipping container full of lithium-ion battery modules, or it may be a redox flow battery string.
Battery Management System (BMS)	An integrated electronic management system for monitoring, measurement, reporting, and protection of a battery storage bank at cell-, module-, and bank-levels.
Distributed Energy Resource (DER)	Generation, storage, and controllable load interconnected to the distribution electric power system.
DER System	One or more DER units that have a common DER controller (e.g., PV unit plus energy storage unit with a single controller, multiple energy storage units with a single controller).
DER Unit	A physical DER entity of one single type (e.g., photovoltaic unit, energy storage unit, or controllable load).
Distribution System Operator (DSO)	Utility managing the distribution power system.
DNP3	Protocol standardized in IEEE 1815 and used by most US utility SCADA systems for monitoring and controlling substation equipment.
Electrical Connection Point (ECP)	The point of electrical connection between a DER system and any electric power system (EPS).
Electric Power System (EPS)	The facilities that deliver electric power to a load or from generation.
EPS, Area	The electric power system (EPS) that serves Local EPSs.
EPS, Local	An EPS contained entirely within a single premises or group of premises.
Energy Storage System (BESS)	A system that can store energy and release that energy as electricity.
Independent System Operator (ISO)	Utility managing the balancing of generation and load within a control area by reflecting the bulk power market while still meeting the power system reliability requirements.
Inverter	Converts from AC to DC and back again. Typically, 4-quadrant. Connected to a single battery bank.
Referenced ECP	The ECP that a DER's function references as the source of power system measurements. Usually this is either the BESS's ECP or the PCC, but other ECPs may be referenced.
Regional Transmission Operator (RTO)	Utility managing the transmission power system.
Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)	System used by utilities and other facilities for controlling and monitoring power system equipment.

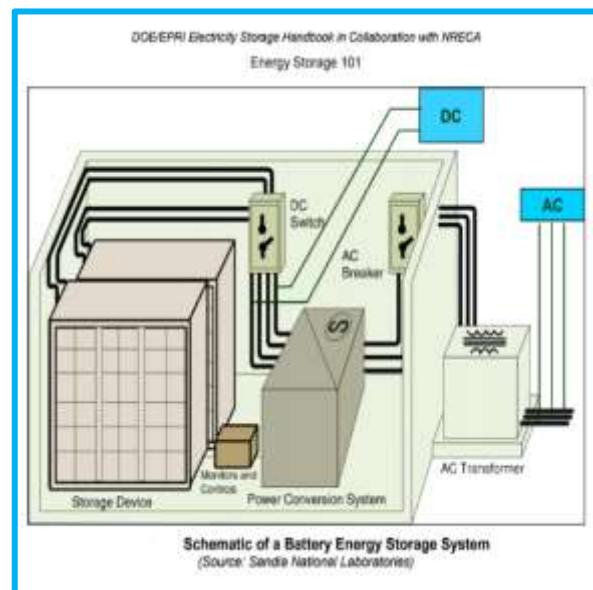
### 3 Stockage d'énergie électrique pour applications stationnaires

#### 3.1 Applications stationnaires de l'électrification dans les réseaux électriques et pour les énergies renouvelables

Le développement croissant des énergies renouvelables et la dynamique insufflée par des politiques pour l'efficacité énergétique ont fait émerger des utilisations diverses des systèmes de stockages d'énergies électriques, dont le stockage d'énergie electrochimique et/ou électrostatique, et cela en mode « off-grid » ou « micro-grid » ou en support aux réseaux. Le positionnement des fabricants et des fournisseurs de nouvelles technologies de batteries et de supercondensateurs sur ce marché de niche (actuellement) leur impose d'avoir des caractéristiques spécifiques pour leurs systèmes de stockage d'énergie et pour leurs interfaces avec les réseaux et/ou les clients finaux selon le type d'application. Plusieurs acteurs ont investi ce domaine ces dernières années. Nous pouvons citer LG, Samsung, Bluesolutions, Tesla, etc. pour la partie stockage d'énergie. Il existe d'autres acteurs pour les interfaces de puissance tels que ABB, Schneider Electric, etc.

Tous ces acteurs s'accordent aujourd'hui à proposer des solutions industrialisables de stockage d'énergie électrique pour les applications ci-dessous.

Ces solutions permettront un stockage allant jusqu'à quelques MWh d'énergie électrique pour un système de stockage d'énergie et des puissances de restitution et de stockage de quelques MW, en fonction des spécifications client et des applications ciblées.

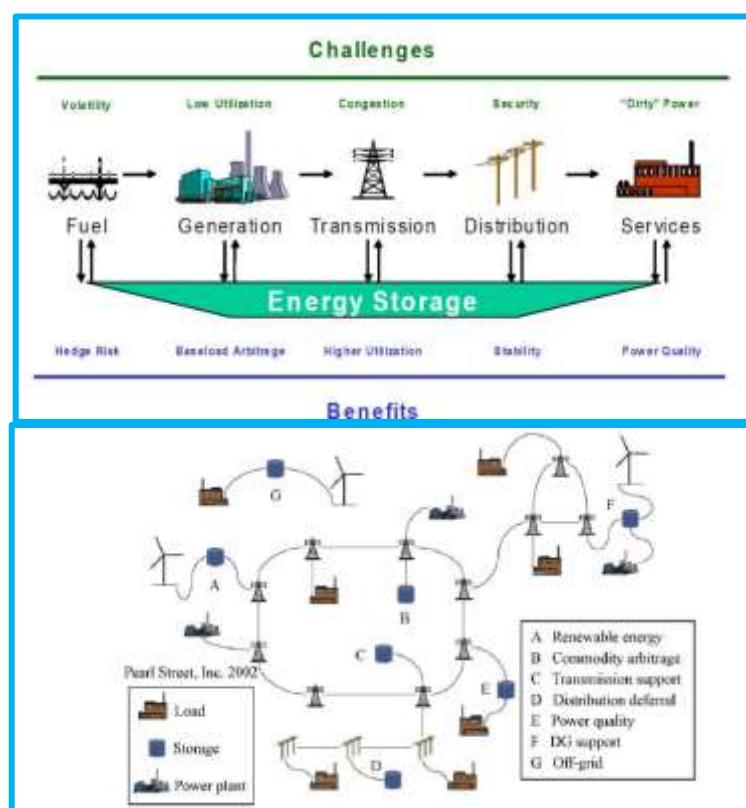


#### Domaines d'applications :

- Utilisation des ESS en application « off-grid » : en particulier pour des alimentations de sites autonomes ou en « micro-grid » en combinaison avec un réseau électrique ;
- Utilisation des ESS en « grid » : consiste à la mise en parallèle de l'ESS avec un réseau public/privé de l'énergie électrique pour des fonctionnements en support ou en injection ;

Naturellement ces différentes utilisations des ESS peuvent se trouver à des niveaux différents de la chaîne de valeurs entre la production de l'énergie électrique et son exploitation :

- services de stockage centralisé positionné au niveau des centrales de génération et de production ;



AH

# L'Electrification et les nouveaux Systèmes d'Information

## Table des matières

<b>4</b>	<b><i>L'Electrification et les nouveaux systèmes d'information .....</i></b>	<b>4—3</b>
4.1.1	Les systèmes de l'information et les TIC et leurs rôles dans l'électrification .....	4—3
<b>4.1</b>	<b>Technologie de l'information, comment ça marche pour les ESS ?.....</b>	<b>4—12</b>
<b>4.2</b>	<b>Références .....</b>	<b>4—17</b>
<b>4.3</b>	<b>Liste des figures.....</b>	<b>4—17</b>

## 4 L'Electrification et les nouveaux systèmes d'information

### 4.1.1 Les systèmes de l'information et les TIC et leurs rôles dans l'électrification

Dans ce chapitre, nous présenterons à travers un exemple le rôle que peuvent jouer les nouvelles technologies de l'information dans l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie électrique dans les systèmes mobiles et les systèmes stationnaires. Pour ces derniers nous avons vu un aperçu du rôle de ces systèmes pour le diagnostic et les mises à jour des logiciels, etc. (cf. chapitre 3). À présent, notre exemple traitera des systèmes d'information et de leur rôle dans la mobilité, en particulier pour les flottes de véhicules. Nous discuterons le cas de l'usage lié à la recharge sans contact des véhicules électriques utilisés dans les systèmes autonomes.

#### Les SI et leur rôle pour la mobilité

Afin d'illustrer le rôle des TIC (technologie de l'information et de la communication) dans la mobilité, prenons un exemple concret qui va nous permettre de mettre l'accent sur ce rôle qui devient de plus en plus important et qui concerne le système de l'électromobilité partagée à travers des véhicules de tout type : véhicule léger, bus électriques, flotte privée, etc.

L'exemple ci-après, dont nous avons déjà protégé les droits, consiste à réaliser une nouvelle approche de l'électromobilité, minimisant les contraintes observées sur les systèmes de véhicules partagés actuels. Le but est de réduire l'utilisation des espaces dédiés à la recharge des véhicules électriques ou hybrides, de surpasser les contraintes de stationnement et d'augmenter la fréquence d'utilisation des véhicules partagés. Ce système est dédié tout particulièrement à un circuit maîtrisé ou à un environnement urbain ou suburbain. Dans une configuration à intégration globale, d'autres véhicules équipés d'un système de stockage d'énergie répondant aux contraintes d'usage pourraient être intégrés comme les flottes de taxis, bus, motos, voitures électriques...)

#### Comment les systèmes d'information ont-ils contribué à l'émergence de l'autopartage ?

Le partage de véhicules en ville existe depuis les années 1960, notamment pour les vélos. Néanmoins, le vandalisme et les vols ont constitué une grande criticité et ont découragé leur émergence et leur démocratisation pendant plusieurs décennies. Heureusement, depuis les années 2000, avec l'accélération du développement des nouvelles technologies et l'apparition des technologies et des systèmes d'information et de communication, ce point est devenu moins critique. En fait, les personnes et les clients sont recherchés et leur paiement est directement débité si nécessaire. Les entreprises économiques voient plus d'efficacité et de rentabilité pour leurs modèles économiques. Au cours des dix dernières années, différents systèmes de partage de véhicules tels que les vélos et les voitures ont vu le jour. Un principe de paiement sécurisé permettant de minimiser le vandalisme et les vols a été lié à l'utilisation du système de carte de crédit. Le client présente sa carte bancaire et renseigne son identité à travers des terminaux physiques ou depuis des applications sur le net. Ces informations permettent de tracer les différents véhicules et utilisateurs. D'autre part, des caméras sont installées dans les stations.

*Par exemple, Autolib' [IER] utilise un système d'information pour superviser en temps réel leurs différents kiosques. Le groupe Bolloré, sélectionné par l'union commune constituée de la ville de Paris et 45 communes environnantes pour mener à bien ce nouveau projet, a géré sa mise en œuvre en mobilisant les compétences et le savoir-faire de ses différentes divisions. Trois modèles de kiosque existent : un kiosque pour l'abonnement, un kiosque pour la location et un dernier pour le chargement de la batterie des véhicules électriques. En (2014), 3500 bornes de recharge ont été déployées à Paris. La société IER, également leader majeur dans le domaine de la traçabilité, de la mobilité et des solutions basées sur les technologies RFID, a fourni la télématique, des systèmes de géolocalisation des véhicules, des systèmes d'information embarqués pour les conducteurs, le module RFID pour l'ouverture des portes de véhicules, l'assistant numérique personnel (PDA) pour le personnel mobile Autolib'. IER a également étudié et mis en place le centre opérationnel Autolib', situé à Vaucresson, qui reçoit et gère tous les appels externes et fonctionne comme*

un centre de surveillance pour superviser en temps réel tous les véhicules, infrastructures et kiosques. Fort de son expertise dans le domaine de la maintenance sur site et des réparations d'atelier, IER effectue des réparations sur site de véhicules ne nécessitant pas de retour au garage, de la surveillance de kiosque et de la maintenance d'atelier pour tous les équipements IER embarqués dans les voitures, ainsi que pour les PDA utilisés par personnel mobile Autolib'.

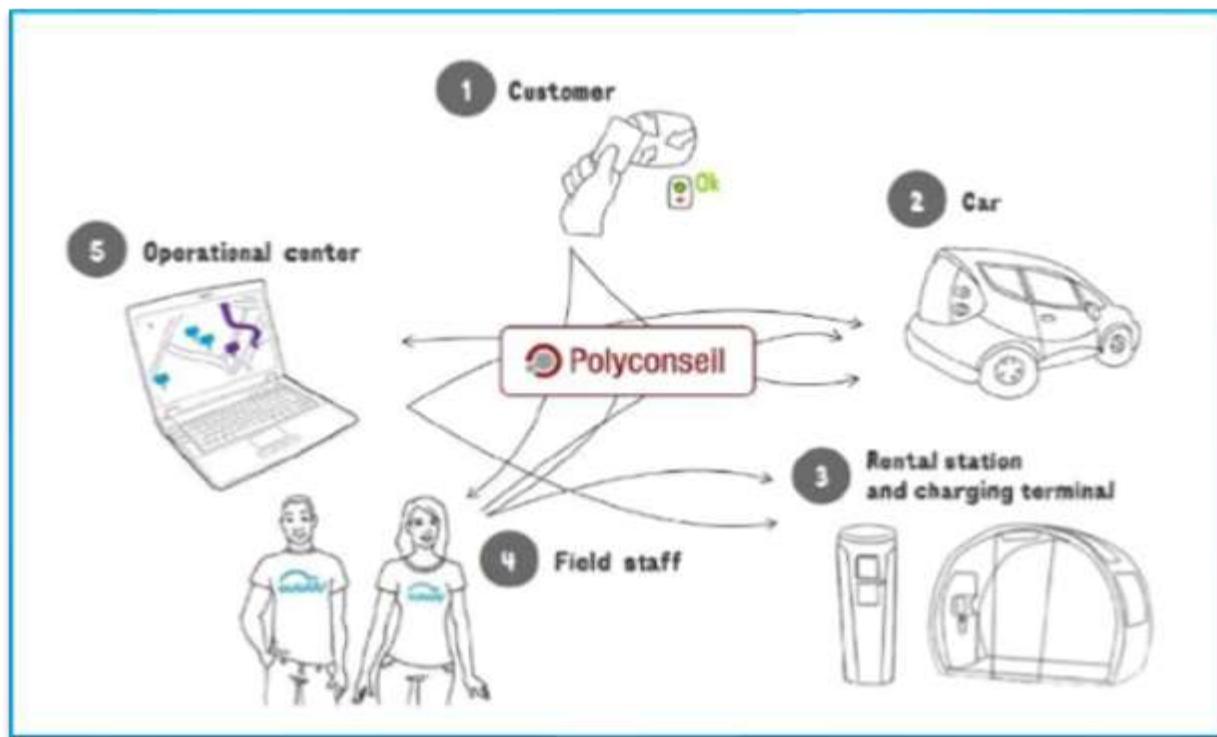


Figure 4.1 Système de gestion à distance

Le Groupe Bolloré a confié à la société Polyconseil la stratégie de gestion de projet, le développement de l'ensemble du système d'information Autolib' (y compris son site Web), ainsi que l'ingénierie des télécommunications et des réseaux du projet. Ce projet multidimensionnel, sélectionné pour les « Designs of the Year 2012 », repose sur l'interconnectivité intelligente de ses composants : le Web, le portail d'abonnement, le CRM, le centre d'appels, le système d'information géographique et les suites de backoffice complètes. L'exemple de Bolloré a été abandonné par la ville de Paris en 2018, néanmoins cette expérience présente un bon début permettant de montrer le lien entre les systèmes de mobilité et les systèmes de communication et d'information.

Dans les paragraphes suivants, nous proposerons un système qui pourrait ressembler à Autolib' pour les petites voitures, mais avec un principe de recharge rapide et qui est extensible pour une électromobilité plus large et plus importante. Nous essayerons de montrer le rôle des technologies et les systèmes d'information dans l'électrification et en particulier l'électromobilité. Ces principes peuvent également contribuer à la prolifération des systèmes autonomes qui avec l'électrification constituent une paire très importante pour la mobilité urbaine moderne et du futur.

AH

# Perspectives de l'Électrification

# Table des matières

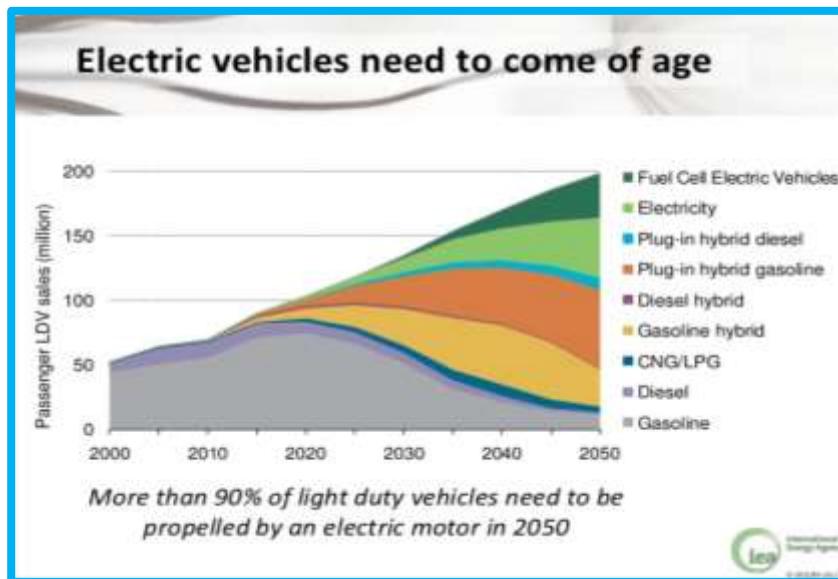
<b>5 Perspectives de l'électrification .....</b>	<b>5—3</b>
<b>  5.1 Perspectives de l'électrification pour les applications mobiles .....</b>	<b>5—3</b>
5.1.1 Introduction .....	5—4
5.1.2 La technologie électrique et les fonctionnalités hybrides pour les machines agricoles,.....	5—7
5.1.2.1 Hybridation .....	5—7
5.1.2.2 Possibilités d'électrification .....	5—10
5.1.2.3 Prototypes de machines agricoles déjà électrifiées.....	5—10
5.1.2.3.1 Prototypes de tracteurs déjà électrifiés .....	5—10
5.1.2.4 Prototypes d'outils déjà électrifiés .....	5—11
<b>  5.2 Étude prospective.....</b>	<b>5—13</b>
5.2.1 Définition des variables .....	5—13
5.2.2 L'adoption et la diffusion de la technologie électrique dans le machinisme agricole .....	5—13
5.2.3 Scénarios.....	5—17
Horizon temporel .....	5—17
5.2.3.1 Le scénario optimiste (optimistic scenario) .....	5—18
5.2.3.2 Scénario pessimiste .....	5—18
5.2.3.3 Discussion sur la diffusion possible du système hybride et électrique pour les machines agricoles 5—19	5—19
5.2.4 Le management de l'innovation pour les acteurs du machinisme agricole .....	5—20
5.2.4.1 Élaboration d'une stratégie d'innovation .....	5—22
5.2.4.1.1 Innovation incrémentale [INNOV] :.....	5—22
5.2.4.1.2 Innovation Disruptive [CLAYTON].....	5—22
5.2.4.2 Approche stratégique dynamique [WARREN01] [WARREN02] .....	5—23
5.2.4.2.1 Construction des scenarios stratégiques.....	5—24
5.2.4.2.2 Scénarios pour l'industrie (Rappel) .....	5—24
5.2.5 L'électrification des machines agricoles : quelle trajectoire ?.....	5—26
5.2.5.1 Scenario: adoption of the Electrical and Hybrid technology as strategic drivers .....	5—29
5.2.5.2 Développement des ressources.....	5—29
5.2.5.3 Suivre les tendances automobiles, voire automotives .....	5—29
5.2.5.4 Développement des ressources humaines .....	5—31
5.2.5.5 Développement de pipeline clients .....	5—32
5.2.5.5.1 Nature des produits des machines agricoles.....	5—32
5.2.5.5.2 Développement du pipeline de clients .....	5—32
5.2.5.5.3 Détérioration des ressources .....	5—33
5.2.5.6 Développement des intangibles liées à l'électrification et à l'hybridation.....	5—33
5.2.5.6.1 Développer les compétences du personnel .....	5—33
5.2.5.7 Développement des capacités .....	5—37
5.2.5.8 Rivalité .....	5—38
<b>  5.3 Références .....</b>	<b>5—40</b>
<b>  5.4 Liste des figures et des tableaux.....</b>	<b>5—41</b>

## 5 Perspectives de l'électrification

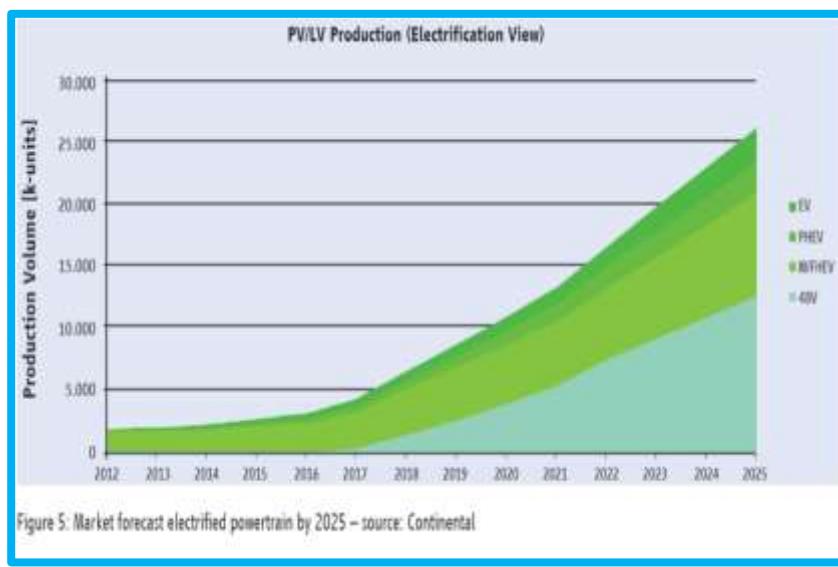
### 5.1 Perspectives de l'électrification pour les applications mobiles

L'électrification dans le domaine de la mobilité suscite beaucoup d'intérêt, car cela peut aider à améliorer la situation de la pollution urbaine voire la réduction de la pollution d'une manière générale. Néanmoins, la diffusion de cette technologie est parsemée de beaucoup d'obstacles et influencée par différents facteurs ; certains facteurs aident à cette introduction et d'autres représentent des obstacles à sa pénétration du marché. Ces facteurs sont de natures différentes, ils sont économiques, sociaux, technologiques, etc.

Dans ce chapitre nous verrons ces différents facteurs et obstacles et de quelle manière nous pourrions imaginer l'électrification et l'hybridation pour les années à venir. Prenons comme exemple le domaine du machinisme agricole et en particulier les tracteurs agricoles. Certes, pas mal d'éléments diffèrent des applications dites « on road », mais nous pouvons facilement constater des ressemblances. D'autre part, les applications « off road » sont intéressantes, car elles montrent plus de diversité d'applications que les véhicules mobiles destinés au transport des personnes. Les applications automotives par exemple sont : traitées par différentes publications ([cf. figure 5.1](#)) de fabricants de voitures et organismes ce qui n'est pas vraiment le cas pour les applications « off road ».



Nous remarquons dans cette étude stratégique l'évolution des différentes courbes en « S » des diverses technologies de voitures. Au moment où les courbes de la solution électrique et hybride croissent, les courbes de la technologie des véhicules classiques (hydrocarbures) rentrent dans la phase de déclin (plus d'explications sur la notion de la courbe en S dans les chapitres ci-dessous).



Les solutions électriques sont multiples, elles sont hybrides ou tout électriques. Les différentes technologies électriques hybrides ou tout électriques peuvent suivre les classes de tensions : tensions <60V (la solution dite 48V) ou les solutions à haute tension > 60V (300, 700V,...).

Figure 5.1 Exemple de courbe de diffusion publiée en 2012 pour l'automobile (source Continental)

### 5.1.1 Introduction

Le secteur agricole en général est une industrie en croissance [cf. figure 5.2 tirée de Mégatendances agricoles mondiales 2030] : la production agricole doit augmenter pour répondre aux exigences de la croissance des populations mondiales ainsi qu'à une demande croissante d'aliments de meilleure qualité et de matières premières lors de la production et la génération de l'énergie. L'utilisation d'équipements agricoles plus efficaces et de services améliorés est l'une des clés pour que la productivité agricole continue d'augmenter afin de permettre de récolter **plus avec moins** de terres arables. L'industrie des machines et des équipements agricoles suit ces tendances et propose des solutions de plus en plus adaptées à ces exigences et à d'autres nécessités de l'industrie agricole.

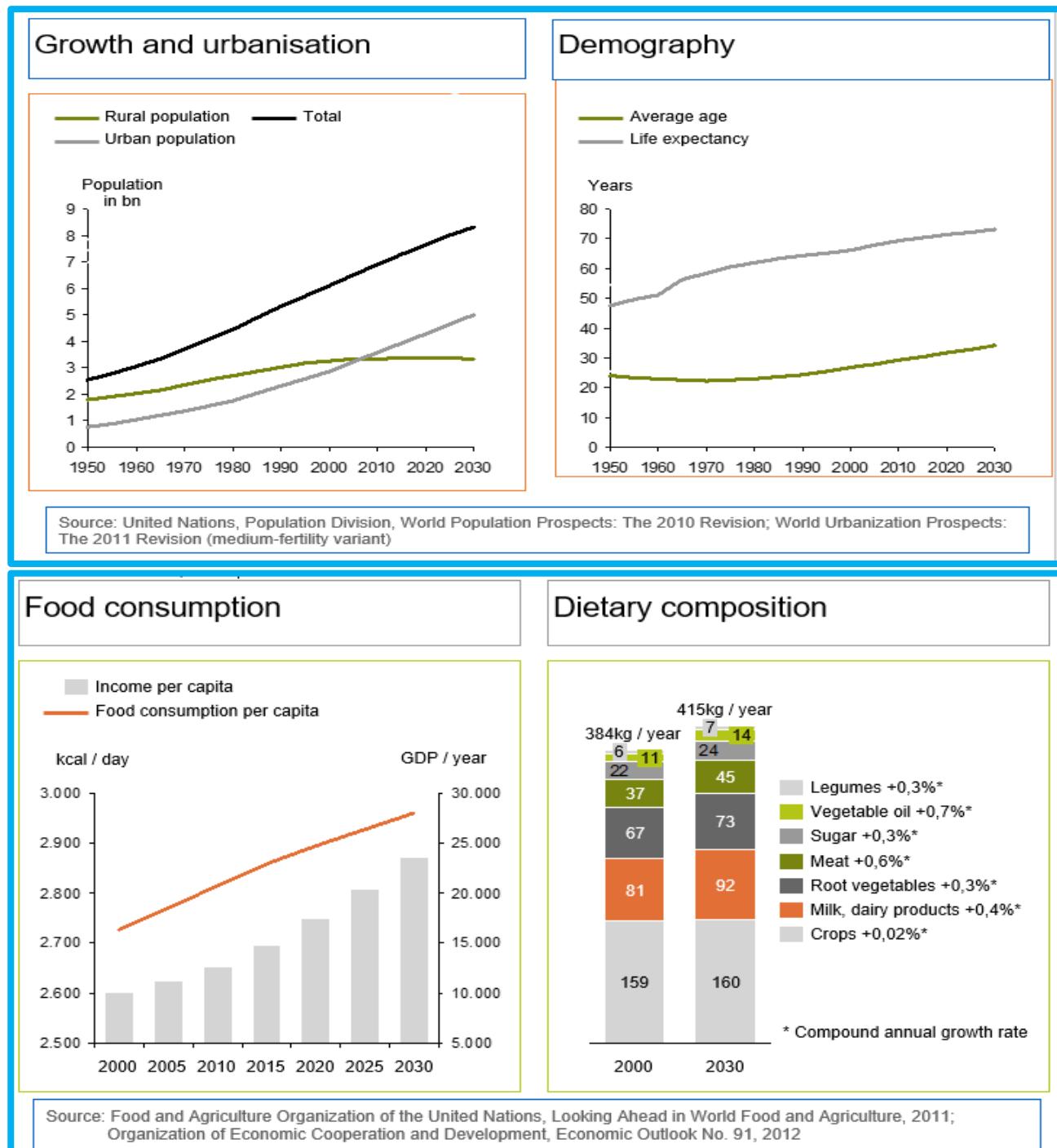


Figure 5.2 Mégatendances agricoles mondiales 2030

Ces dernières années, la demande de matériel agricole a augmenté avec des contraintes d'efficacité et de meilleures performances. Par conséquent, et pour y répondre, de nouvelles solutions pourraient être nécessaires pour maintenir des rendements compatibles avec les différentes situations et satisfaire aux futures demandes législatives, économiques, écologiques et aux demandes des clients. Pour ce faire, une des technologies susceptibles de répondre à ces exigences pourrait consister à mettre en œuvre les techniques d'hybridation et les technologies électriques. Ces techniques et technologies appliquées aux machines agricoles peuvent réduire la consommation de carburant, améliorer la conduite, augmenter l'efficacité du travail, apporter des bénéfices à l'utilisateur (Customer benefits) et lui apporter plus de confort, tout en offrant un packaging et des avantages pour le client. En fait, cette technologie est utilisée dans un large éventail d'applications, y compris pour les locomotives, les véhicules de tourisme et les équipements routiers lourds ; et elle présente de nombreux avantages [Bernardo]. Les machines agricoles actuelles ont probablement atteint certaines limites en termes de complexité et d'efficacité avec la technologie mécanique et hydraulique. Dès lors, les recherches sont orientées sur l'utilisation de la technologie électrique. Au cours des dernières années, un nombre croissant de projets de propulsion et de traction appliqués aux machines agricoles sont observés [salon Agritechnica2012], de sorte que nous nous attendons à ce que de nouvelles applications ou même des produits commerciaux en découlent à l'avenir. La feuille de route théorique pour l'électrification des machines agricoles réalisée pourrait être développée en deux phases [Hammar01] :

- la phase transitoire où les puissances « réseaux électriques embarqués » coexisteront avec les puissances mécaniques et la puissance hydraulique ;
- la phase dite stable ou établie intervient dans la deuxième étape lorsque le système électrique peut remplacer partiellement ou complètement la puissance fournie mécaniquement et/ou hydrauliquement.

Le principal but de ce travail est d'explorer l'évolution possible de l'électrification des machines agricoles selon la première phase à un horizon de courts et moyens termes. Par conséquent, nous essayons de construire le déploiement de scénarios de cette mutation technologique en analysant l'état actuel de l'industrie des machines agricoles et en identifiant les facteurs qui affecteront son émergence et sa diffusion, puis en imaginant les trajectoires de ses évolutions. Basée sur une approche simple de la méthode des scénarios [ALEPH], cette approche peut aider à hiérarchiser les idées et identifier les leviers d'action pour l'avenir [Hammar02]. Cela peut être utile aux industriels qui cherchent à connaître les orientations à donner à leur recherche et développement (R et D) pour assurer la compatibilité des innovations et anticiper les besoins technologiques des autres acteurs de la chaîne de production au bon moment.

Différents constructeurs réfléchissent à la possibilité de travailler sur la technologie électrique, néanmoins le processus de décision nécessite davantage de données et une stratégie appropriée. Donc, une question importante est liée à l'évaluation des risques, des retombées économiques et des différentes stratégies à adopter dans l'objectif d'établir une feuille de route et un business plan à moyen terme. Les différents investissements de fabrication et de commercialisation doivent se nourrir de justifications solides.

Ainsi, pour le secteur des machines agricoles, ce genre d'analyse a principalement les objectifs suivants :

- l'évaluation de l'opportunité et de sa saisie en établissant une stratégie adaptée : différentes entreprises sont intéressées au développement de l'hybridation et de l'électrification dans le domaine du machinisme agricole. Néanmoins, les premières étapes de la production et de la commercialisation ne sont pas encore lancées. La stratégie des entreprises est influencée par plusieurs paramètres et facteurs. Ainsi, cette technologie peut représenter une opportunité pour les fabricants, nous essayons d'évaluer les différents facteurs et d'établir des possibilités d'opportunité à courts et moyens termes ;
- la valorisation des risques liés à l'abandon de l'électrification/hybridation pour l'entreprise, c'est-à-dire l'évaluation des risques sur le positionnement et la croissance de l'entreprise, si l'entreprise ne souscrit pas la technologie électrique dans son développement futur :