

Les accumulateurs

Un accumulateur électrochimique est un dispositif qui permet de contrôler en son sein une réaction d'oxydoréduction entre un matériau réducteur et un matériau oxydant, et de faire circuler dans un circuit électrique extérieur les électrons mis en jeu, générant ainsi un courant électrique. Son intérêt est de pouvoir être utilisé soit comme un générateur - c'est la phase de décharge de l'accumulateur - soit comme un récepteur - c'est la phase de charge ou de recharge. Les accumulateurs ont pris de plus en plus d'importance dans notre vie quotidienne tant nous utilisons de dispositifs mobiles ou portables comme les véhicules à moteurs thermiques qui les utilisent lors du démarrage - et aussi pour de nombreuses autres fonctions... -, les véhicules à moteurs électriques, les téléphones et les ordinateurs portables ainsi que tous les dispositifs électroniques nomades.

Cette étude documentaire est complétée par un article du magazine *La Recherche*[®] n°553 de novembre 2019 qui présente les débuts de la voiture électrique à la fin du XIX^{ème} siècle.

Un accumulateur est constitué de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte assurant le transport des ions entre ces électrodes. Celles-ci sont conductrices et permettent l'apport ou le départ d'électrons ce qui va permettre la circulation d'électrons dans le circuit extérieur. L'électrolyte, conducteur ionique, doit être un isolant électronique - c'est-à-dire qu'il ne laisse pas passer les électrons.

Les principales grandeurs caractéristiques accumulateurs sont leur tension nominale de fonctionnement (V), leur capacité (Ah) qui représente la charge totale disponible, leur énergie et puissance spécifiques (Wh/kg, W/kg), leur densité d'énergie et de puissance (Wh/L, W/L), leur cyclabilité¹, leur durée de vie et leur rendement énergétique.

1 L'accumulateur au plomb

C'est le premier accumulateur industriel qui a été mis au point en 1859 par GASTON PLANTÉ. Son utilisation depuis environ 150 ans a été tout à fait considérable, voir les photographies de la figure 1. Le matériau de base de cet accumulateur est le plomb comme son nom l'indique.

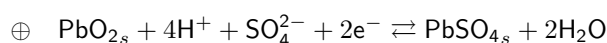


FIGURE 1 – Accumulateurs au plomb

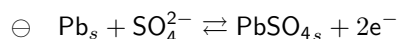
1.1 Les réactions de transferts électroniques

Les réactions sont présentées ici dans le sens de la décharge de l'accumulateur, c'est-à-dire dans le cas où l'accumulateur se comporte en générateur.

À la cathode, l'oxyde de plomb se réduit et se transforme en sulfate de plomb :



À l'anode, le plomb s'oxyde en sulfate de plomb selon :



1. La cyclabilité représente le nombre de cycle charge-décharge d'un accumulateur jusqu'à ce qu'il ne soit plus utilisable.

La réaction-bilan des deux processus électroniques mis en jeu au niveau des électrodes est donc :



La tension à vide d'une cellule d'accumulateur au plomb est d'environ 2,0 V. Elle dépend des potentiels rédox standard des deux couples mis en jeu mais aussi de la concentration en acide sulfurique H_2SO_4 qui est de l'ordre de 4 à 5 mol · L⁻¹. Très souvent, les batteries des voitures fournissent une tension à vide de 12 V. On obtient cette tension en mettant en série 6 cellules telle que celle que nous venons de décrire.

1.2 Caractéristiques

Les principales caractéristiques de l'accumulateur au plomb sont données dans le tableau suivant :

énergie massique Wh/kg 30 à 40	énergie volumique Wh/L 60 à 75	fem V 2,0	température °C -40 à 40	cycles 400 à 800
-----------------------------------	-----------------------------------	--------------	----------------------------	---------------------

Lors de l'achat d'une batterie, la donnée souvent mise en avant est la capacité de stockage des charges exprimées très souvent en *Ampère - heure* d'unité Ah. Le produit d'une durée par une intensité électrique est bien une charge en COULOMB puisque $i = \frac{dq}{dt}$. Cette donnée n'est toutefois pas une caractéristique intrinsèque de la batterie car elle dépend de l'intensité du courant fourni par l'accumulateur. Par exemple, une batterie donnée pour 100 Ah peut théoriquement fournir une intensité de 10 A pendant 10 h. La même batterie ne possède plus qu'une capacité de 90 Ah si l'on demande une intensité de 20 A qui ne pourra être donnée que pendant 4,5 h. Des limitations cinétiques interviennent lors de transferts de charge au niveau des électrodes. La capacité d'une batterie décroît aussi de 20% environ entre 20 °C et 0 °C, cela explique les difficultés de démarrage en hiver. La capacité de la batterie diminue aussi au fil du temps même lorsqu'elle n'est pas utilisée. Cette auto-décharge est une conséquence de la présence de la solution d'acide sulfurique concentré qui sert d'électrolyte. À la cathode, l'oxyde de plomb PbO_{2s} est un fort oxydant qui va avoir tendance à oxyder l'eau de l'électrolyte en dioxygène O_2 . À l'anode, c'est le plomb Pb_s qui va s'oxyder et réduire l'eau en dihydrogène H_2 . Heureusement, les surtensions cinétiques de ces deux processus rédox sont assez élevées et l'auto-décharge est relativement lente puisqu'elle représente une perte de charge de 5% par mois.

L'accumulateur au plomb a été particulièrement utilisé car il possède beaucoup d'avantages par rapport à d'autres types d'accumulateurs. Avec la mise au point récente de nouveaux types d'accumulateurs que nous décrirons par la suite, son utilisation est en régression. Parmi ces avantages, on peut citer le fait que le plomb est un matériau peu coûteux et peu corrodable. De plus, les deux couples rédox mis en jeu concerne tous les deux le même élément chimique, le plomb sous trois degrés d'oxydation différent. La résistance interne de la batterie est de l'ordre de 0,1 Ω. Elle est relativement faible mais n'oublions pas qu'au moins au moment du démarrage d'une voiture l'intensité appelée est très élevée. Par conséquent, tout gain sur la résistance interne sera appréciable pour que la tension fournie par la batterie ne diminue pas trop. Le démarreur d'une voiture demande une puissance de l'ordre de 1 000 W, avec une batterie de fem 12 V, l'intensité appelée représente alors environ 80 A. Avec une résistance interne de 0,1 Ω, cela représente une chute de tension de 8 V ! On comprend alors toute l'importance de la valeur de la résistance interne de l'accumulateur.

L'accumulateur au plomb présente aussi quelques inconvénients notables. En effet, c'est un métal lourd qui est très toxique. Les composés du plomb possède une masse volumique élevée, la batterie est très lourde. Sa masse est souvent supérieure à 15 kg. Son énergie massique est donc faible de l'ordre de 35 Wh/kg.

Nous retiendrons en conclusion que le plus grand avantage des accumulateurs au plomb est leur coût qui est le plus faible de tous les types d'accumulateurs que nous allons présenter.

2 Accumulateurs nickel-cadmium

Ces accumulateurs, dans leur version portable, sont apparus dans les années 1950. Ils sont robustes et présentent une excellente durée de vie pour des conditions moins contraignantes que d'autres couples. Ils acceptent de longues durées de stockage et sont aptes à l'utilisation dans une plus large plage de température que les autres accumulateurs portables. Certains modèles supportent aussi des modes de charge très rapide. Ils sont remplacés de nos jours par des accumulateurs nickel-métal hydrure ou lithium, voir les photographie de la figure 2.

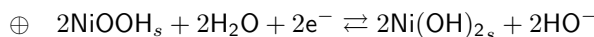


FIGURE 2 – Accumulateurs nickel-cadmium

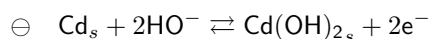
2.1 Les réactions de transferts électroniques

Les réactions sont présentées ici dans le sens de la décharge de l'accumulateur, c'est-à-dire dans le cas où l'accumulateur se comporte en générateur.

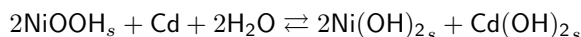
À la cathode, l'oxyhydroxyde de nickel se réduit et se transforme en hydroxyde de nickel :



À l'anode, le cadmium s'oxyde en hydroxyde de cadmium selon :



La réaction-bilan des deux processus électroniques mis en jeu au niveau des électrodes est donc :



La tension à vide d'une cellule d'accumulateur nickel-cadmium est d'environ 1,3 V. Elle dépend des potentiels rédox des couples mis en jeu mais aussi de l'électrolyte qui est une solution aqueuse très basique (alcaline) constituée par de l'hydroxyde de sodium² NaOH ou de l'hydroxyde de potassium KOH additionné ou non d'hydroxyde de lithium LiOH. La concentration de l'électrolyte est d'environ $7 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.2 Caractéristiques

Les principales caractéristiques de l'accumulateur nickel-cadmium sont données dans le tableau suivant :

énergie massique Wh/kg	énergie volumique Wh/L	fem V	température °C	cycles
40 à 60	50 à 150	1,3	-20 à 70	500 à 1 000

Les accumulateurs nickel-cadmium sont intéressants sur le plan économiques et permettent d'atteindre de bien meilleures énergies volumiques que les accumulateurs au plomb. Ils peuvent aussi être chargés rapidement typiquement sur des durées de l'ordre de l'heure. Sa résistance interne est de l'ordre de $0,1 \Omega$. Les inconvénients de ces accumulateurs sont à la fois une auto-décharge de 20% par mois et la dangerosité du nickel et du cadmium pour la santé. Le recyclage est obligatoire. Le principal problème reste le risque de contamination de l'environnement et le maillon faible du recyclage est la mise en place d'une collecte efficace.

2. De la soude.

3 Accumulateurs nickel-métal hydrure

Ces accumulateurs dans leur version portable, ont été commercialisés, au tout début des années 1990, au Japon et ensuite en Europe, en Asie du Sud-Est et aux États-Unis. Le Japon est toutefois resté le leader incontesté avec plusieurs fabricants majeurs. Le développement s'est effectué sur une longue période, qui a duré plus de 20 ans. Ils constituent un prolongement des accumulateurs nickel-cadmium ; un grand nombre de leurs caractéristiques sont très voisines, ce qui permet d'assurer une assez bonne interchangeabilité. Ces accumulateurs se sont imposés dans les applications qui demandent plus d'énergie volumique (appareil photo, caméscope, ordinateur portable, téléphone portable, vélo assisté électriquement...), voir les photographies de la figure 3.

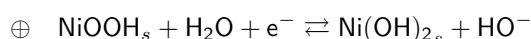


FIGURE 3 – Accumulateurs nickel-métal hydrure

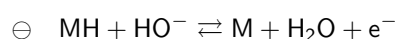
3.1 Les réactions de transferts électroniques

Les réactions sont présentées ici dans le sens de la décharge de l'accumulateur, c'est-à-dire dans le cas où l'accumulateur se comporte en générateur.

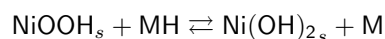
À la cathode, l'oxyhydroxyde de nickel se réduit et se transforme en hydroxyde de nickel :



À l'anode, le cadmium s'oxyde en hydroxyde de cadmium selon :



La réaction-bilan des deux processus électroniques mis en jeu au niveau des électrodes est donc :



La tension à vide d'une cellule d'accumulateur nickel-métal hydrure est d'environ 1,3 V. Elle dépend des potentiels rédox des couples mis en jeu mais aussi de l'électrolyte qui est la même solution aqueuse très basique que pour les accumulateurs nickel-cadmium. Elle est donc constituée par de l'hydroxyde de sodium NaOH ou de l'hydroxyde de potassium KOH additionné ou non d'hydroxyde de lithium LiOH. La concentration de l'électrolyte est d'environ $7 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. L'hydrure le plus courant est un alliage de lanthane et de nickel contenant de l'hydrogène. Sa formule est $\text{LaNi}_5/\text{H}_x\text{LaNi}_5$.

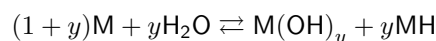
3.2 Caractéristiques

Les principales caractéristiques de l'accumulateur nickel-métal hydrure sont données dans le tableau suivant :

énergie massique Wh/kg	énergie volumique Wh/L	fem V	température °C	cycles
40 à 60	30 à 100	1,3	0 à 40	1 500

Cet accumulateur a beaucoup de points communs avec l'accumulateur nickel-cadmium. Il se charge rapidement par exemple mais la principale différence est une moindre élévation de tension en fin de charge et des modes de charge qui évitent l'échauffement pour bénéficier d'une meilleure durée de vie. La résistance interne initiale est voisine de celle de l'accumulateur nickel-cadmium quoique légèrement plus élevée à technologie identique. La principale différence est sa moins bonne stabilité en vieillissement. Son auto-décharge est nettement moins bonne que les précédentes puisqu'elle est de 30% pour un mois. C'est dans le domaine des hautes énergies et des hautes puissances dans lequel les accumulateurs nickel-hydrure de métal se sont développés.

Toutefois, le problème principal de l'alliage métal-hydrure est la corrosion. Parmi les métaux de l'alliage, seuls le nickel et le cobalt sont assez nobles pour être protégés. L'eau de l'électrolyte basique réagit sur le métal. Elle a pour conséquence de réduire la quantité d'alliage qui stocke l'hydrogène dans les sites du cristal. La réaction de corrosion est :



4 Accumulateurs lithium-ion

L'intérêt du lithium est son caractère très réducteur. Le potentiel rédox standard du couple Li^+/Li est $E^\circ = -3,0 V$. On peut donc espérer en utilisant ce couple obtenir des tensions à vide très élevées par rapport aux autres accumulateurs. Cet avantage a nécessairement une contre-partie puisqu'avec un tel caractère réducteur, la réaction sur l'eau serait très violente. Il faut travailler dans des solvants organiques ou avec comme électrolytes des polymères gélifiés. De nos jours, ces accumulateurs règnent de façon quasi-exclusive sur le domaine des ordinateurs et des téléphones portables. C'est avec l'insertion du lithium dans une structure hôte en carbone que *Sony* a commercialisé, depuis le début des années 1990, un accumulateur de tension voisine de 3,6 V pour des applications vidéo et téléphonie et l'a baptisé *lithium-ion*, voir les photographies de la figure 4.

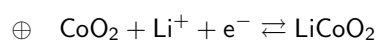


FIGURE 4 – Accumulateurs lithium-ion

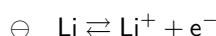
4.1 Les réactions de transferts électroniques

Les réactions sont présentées ici dans le sens de la décharge de l'accumulateur, c'est-à-dire dans le cas où l'accumulateur se comporte en générateur. À l'anode, on devrait écrire $Li(C)$ ce qui signifie que le lithium est dissous dans le carbone C. Par souci de simplification, on écrit seulement Li comme si le lithium était libre alors qu'il est dissous dans une matrice en carbone.

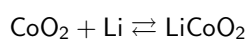
À la cathode, l'ion lithium se réduit :



À l'anode, le lithium s'oxyde en ion lithium :



La réaction-bilan des deux processus électroniques mis en jeu au niveau des électrodes est donc :



L'électrolyte est constitué par un solvant organique aprotique additionné de LiPF_6 . La recherche du solvant est conduite pour disposer d'une bonne conductivité dans la plage de température mais aussi à la stabilité thermique, chimique et électrochimique, la toxicité, la sécurité et le coût. Toutefois, cette conductivité reste 0 fois inférieure à la conductivité des électrolytes aqueux.

4.2 Caractéristiques

Les principales caractéristiques de l'accumulateur lithium-ion sont données dans le tableau suivant :

énergie massique Wh/ kg	énergie volumique Wh/L	fem V	température °C	cycles
150 à 250	250 à 600	3,6	-20 à 60	1 500

La tension à vide de l'accumulateur varie très peu avec la température. Les accumulateurs lithium-ion sont chargés jusqu'à une limite supérieure de tension choisie par le constructeur pour garantir la réversibilité et la sécurité. La charge est donc effectuée avec des chargeurs spécifiques qui fonctionnent généralement avec un courant constant. La résistance interne est plus élevée que celle des accumulateurs alcalins d'énergie globale équivalente. La présence de dispositifs de sécurité pénalise aussi l'accumulateur lithium-ion. Toutefois, il faut la mise en série de trois accumulateurs alcalins pour égaler la tension du lithium-ion. L'auto-décharge des accumulateurs est inférieure à 5%.

La nouvelle technologie lithium-ion récemment mise au point a révolutionné le domaine des accumulateurs, qui n'avait pas connu un tel progrès depuis près d'un siècle. D'abord développée pour les applications portables, elle est maintenant mise en oeuvre dans les gros accumulateurs où la densité d'énergie et la longévité sont des propriétés essentielles, comme par exemple pour les satellites et très bientôt les voitures électriques. Des améliorations sont encore à attendre, grâce aux travaux menés sur de nouvelles matières actives, tout en restant sur le même principe électrochimique de base. Le coût élevé de fabrication, en grande partie dû aux matériaux, est un obstacle important pour la diffusion des grosses batteries. Une réduction est attendue avec le développement du marché.

5 Accumulateurs lithium-fer-phosphate LFP

L'utilisation du lithium est, comme dans le cas précédent, dû à son caractère très réducteur. On obtient toujours des tensions à vide élevées par rapport aux autres accumulateurs voir la photographie de la figure 15.

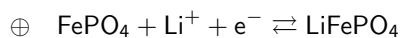


FIGURE 5 – Accumulateur lithium-fer-phosphate LFP

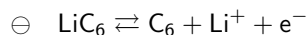
5.1 Les réactions de transferts électroniques

Les réactions sont présentées ici dans le sens de la décharge de l'accumulateur, c'est-à-dire dans le cas où l'accumulateur se comporte en générateur. L'anode est constituée par du graphite de formule C_6 dans lequel est dissous du lithium Li alors que la cathode est en $LiFePO_4$.

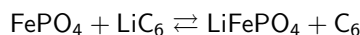
À la cathode, l'ion lithium se réduit :



À l'anode, le lithium s'oxyde en ion lithium :



La réaction-bilan des deux processus électroniques mis en jeu au niveau des électrodes est donc :



5.2 Caractéristiques

Les principales caractéristiques de l'accumulateur lithium-fer-phosphate sont données dans le tableau suivant :

énergie massique Wh/kg	énergie volumique Wh/L	fem V	température °C	cycles
85	135	3,2	-20 à 50	3 000

Les batteries lithium fer phosphate LFP sont les plus sûres parmi les batteries au lithium-ion traditionnelles. Leur durée de vie s'améliore même légèrement en cas de charge partielle au lieu d'une charge complète, contrairement à la majorité des autres batteries.

6 Accumulateurs lithium-titanate LTO

L'utilisation du lithium est, comme dans le cas précédent, dû à son caractère très réducteur. On obtient toujours des tensions à vide élevées par rapport aux autres accumulateurs. C'est en 2005 que *Toshiba* a commencé à commercialiser ces accumulateurs, voir les photographies de la figure 6.

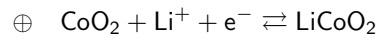


FIGURE 6 – Accumulateur lithium-titanate LTO

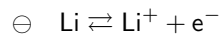
6.1 Les réactions de transferts électroniques

Les réactions sont présentées ici dans le sens de la décharge de l'accumulateur, c'est-à-dire dans le cas où l'accumulateur se comporte en générateur. À l'anode, on devrait écrire $Li(Li_2TiO_3)$ ce qui signifie que le lithium est dissous dans Li_2TiO_3 . Ce composé est appelé titanate de lithium car c'est un alliage d'oxyde de lithium Li_2O et d'oxyde de titane TiO_2 avec la stoechiométrie de 1/1. Par souci de simplification, on écrit seulement Li.

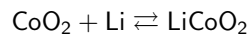
À la cathode, l'ion lithium se réduit :



À l'anode, le lithium s'oxyde en ion lithium :



La réaction-bilan des deux processus électroniques mis en jeu au niveau des électrodes est donc :



6.2 Caractéristiques

Les principales caractéristiques de l'accumulateur lithium-ion sont données dans le tableau suivant :

énergie massique Wh/kg 100	énergie volumique Wh/L 202	fem V 2,3	température °C -30 à 55	cycles 15 000
-------------------------------	-------------------------------	--------------	----------------------------	------------------

7 Tableau récapitulatif

	énergie massique Wh/kg	énergie volumique Wh/L	fem V	température °C	cycles
Pb	30 à 40	60 à 75	2,0	-40 à 40	400 à 800
Ni – Cd	40 à 60	50 à 150	1,3	-20 à 70	500 à 1 000
Ni – MH	40 à 60	30 à 100	1,3	0 à 40	1 500
Li – <i>ion</i>	150 à 250	250 à 600	3,6	-20 à 60	1 500
LFP	85	135	3,2	-20 à 50	3 000
LTO	100	202	2,3	-30 à 55	15 000

8 La mobilité de demain

8.1 Depuis 2019 à Nantes : le e-Busway

La ligne 4 de la SEMITAN à Nantes utilisait un Busway fonctionnant au gaz. Depuis 2019, il est remplacé par un e-Busway électrique à recharge rapide à certains arrêts, voir la photographie de la figure 7. Les batteries sont des lithium-titanate (LTO) de *Toshiba*.



FIGURE 7 – Le e-Busway nantais

Voici les renseignements techniques que j’ai pu obtenir auprès de la SEMITAN. La capacité totale embarquée sur le véhicule est de 128 kWh. Le poids approximatif du pack batterie avec son groupe de refroidissement est de 3 tonnes. Pour préserver la durée de vie de ce type de technologie de batterie, celle-ci doit être sollicitée préférentiellement (98% du temps environ) entre 45% et 90% de SOC (State of Charge). Les derniers pourcentages entre 90% et 100% peuvent être atteints mais pas à pleine puissance de recharge. La marge aussi bien haute que basse permet de préserver la durée de vie de la batterie. En fin de vie (10 ans pour la SEMITAN), la résistance interne de la batterie aura doublée et la batterie aura perdue 20% de sa capacité.

Ce type de technologie de batterie accepte une charge ou décharge avec des intensités très élevées. Dans le cas du e-Busway, les batteries vont être rechargées à une puissance de 600 kW soit $600\text{ V} \times 1000\text{ A}$. Les bus rechargent leurs batteries grâce à des stations de recharge rapide, en forme de potence, implantées aux terminus Foch et Porte de Vertou, et dans deux stations intermédiaires. Lors de l’arrêt, un bras articulé inséré dans le toit du bus vient se connecter à la potence de charge. Les temps de connexion et de déconnexion sont très courts de l’ordre de la seconde et l’opération ne nécessite pas d’intervention du conducteur. Sur les deux stations intermédiaires de la ligne 4, la durée de la recharge sera de 20 s. Aux terminus, l’arrêt du bus étant plus long, la recharge bénéficiera d’un temps beaucoup plus long.

8.2 Véhicules du présent... du futur...

Le constructeur emblématique de voitures électriques est évidemment *Tesla* qui commercialise déjà des véhicules électriques depuis quelques années. Malgré les aléas connus par l’entreprise qui ne fait pas encore de bénéfices, elle a produit depuis 2003 un peu plus de 1 000 000 de voitures. À titre de comparaison, le site *Peugeot* à Sochaux (Doubs, France) a produit en 2018 un peu plus de 500 000 voitures traditionnelles. Sur la photographie de la figure 8, le roadster *Tesla* commercialisé en 2020.

Nettement moins connue, une autre entreprise, dotée elle aussi d’un nom de physicien, *Faraday Future* doit fabriquer prochainement son premier véhicule électrique commercial la FF91 que l’on peut voir sur la photographie de la figure 9. Cette entreprise dont l’usine se situe en Californie est financée par des fonds chinois. Elle s’est trouvée virtuellement en faillite fin 2018. Elle semble relancée mais comme au début de l’automobile autour de 1900, des précurseurs, des pionniers ont disparu du paysage du monde automobile. L’aventure industrielle ne se conjugue pas toujours avec la réussite économique...

Pour *Peugeot*³, la mobilité électrique peut aussi devenir une réalité prochaine. Sur la photographie de la figure 10, on peut voir le concept *Peugeot E-LEGEND*. Cette voiture inspirée d’un modèle des années 1970 a

3. On notera que *Renault* est en avance en matière de mobilité électrique, en particulier, avec sa *Zoé*.

FIGURE 8 – Roadster *Tesla* en 2020FIGURE 9 – FF91 : l'hypothétique voiture électrique de *Faraday Future*

été pensée en utilisant les technologies les plus accessibles pour une éventuelle réalisation à grande échelle. Un peu avant 1970, *Peugeot* confie au designer italien *Pininfarina*⁴ le dessin de la 504 coupé-cabriolet. On peut voir la filiation entre cette 504 et le concept électrique actuel sur la photographie de la figure 11. Il est envisagé que la recharge des batteries de l'E-LEGEND soit réalisée par induction.

FIGURE 10 – Concept *Peugeot E-LEGEND*

4. *Pininfarina* est le traditionnel cabinet de design de *Ferrari*.



FIGURE 11 – E-LEGEND et 504 coupé

En 2019, Peugeot propose une version électrique de la nouvelle 208.



FIGURE 12 – Une déclinaison entièrement électrique de la 208 en 2019

Sans doute nettement moins accessible, le constructeur italien Maserati proposera aussi prochainement une voiture électrique.



FIGURE 13 – Maserati électrique

9 L'entreprise française Forsee Power

Forsee Power est un groupe industriel français spécialiste des systèmes de batteries pour les marchés du transport électrique (bus, train, bateau). Il produit des batteries aux spécificités différentes. Les batteries sont conçues par association série et/ou parallèle d'un module de base. On obtient une grande gamme de possibilités. Les modules sont des Lithium-Ion dans deux technologies différentes : la technologie LTO vue avant et la technologie NMC. Dans ce dernier cas, la cathode est constituée par un composé utilisant du Nickel, du Manganèse et du Cobalt (NMC) de formule LiNiMnCoO_2 . Quant à l'anode, elle est constituée de graphite C ou plus exactement C_6 .

La batterie ZEN 35[®] est destinée à être rechargée une seule fois par jour (la nuit de préférence) mais chacun de ses modules stocke une grande quantité d'énergie : 35 kWh. La batterie PULSE 15[®] stocke moins d'énergie mais elle est destinée à être rechargée en 20 s environ 200 fois par jour. Elle se caractérise par sa puissance nettement plus élevée que la ZEN 35[®] qui a l'avantage sur le plan de l'énergie totale stockée. La batterie FLEX 7[®] est un compromis entre nombre de recharges supérieur à une par jour, puissance et énergie stockée. Voir les photographies de la figure 14.



FIGURE 14 – Batteries de Forsee Power : ZEN 35[®] - PULSE 15[®] - FLEX 7[®]

Voici un tableau récapitulatif de quelques propriétés de ces batteries :

	ZEN 35 [®]	PULSE 15 [®]	FLEX 7 [®]
Type	NMC	LTO	NMC
Énergie (kWh)	35	15	7
Capacité (Ah)	54	23	40
Puissance (kW)	12	76	18
Pic de puissance (kW)	35	127	27
Courant (A)	18	120	200
Pic de courant (A)	54	200	300
Masse (kg)	280	260	83
Volume (L)	268	252	55
Énergie par kg ($\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$)	125	58	84
Énergie par L ($\text{Wh} \cdot \text{L}^{-1}$)	131	59	127
Puissance par kg ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	43	292	217

10 Projets pour les véhicules lourds

On peut envisager plusieurs types de technologie. les véhicules sont équipés de batteries qui sont rechargées sur le secteur ou bien des véhicules équipés de piles à combustibles et de réservoirs de dihydrogène H_{2liq} sous forte pression.



FIGURE 15 – Prototype de camion Mercedes électrique



FIGURE 16 – Prototype de camion Tesla électrique

Le prototype de camion électrique de Volvo est autonome. . .



FIGURE 17 – Prototype de camion électrique autonome sans cabine Volvo

