

Dans un système embarqué, le stockage de l'énergie électrique est réalisé principalement par des accumulateurs électrochimiques (plomb-acide, lithium-ion,...). Grâce à la réversibilité des réactions au sein de ces éléments, il est possible de les recharger à partir d'une source d'énergie électrique (réseau embarqué, panneau photovoltaïque, générateur).

L'autonomie est dépendante du niveau d'énergie stockée dans l'accumulateur (exprimée en Ah associée à une tension).

Dans le domaine des transports (rail, route, avion), les besoins en énergie sont plus élevés.

Pour un véhicule électrique, l'énergie embarquée est de l'ordre de 20kWh (72mégaJoule) pour une autonomie d'environ 150km.

Type	Densité massique en Wh/kg	Densité volumique en Wh/L	Tension d'un élément	puissance en pointe(massique) en W/kg	Durée de vie (nombre de recharges)	auto-décharge par mois
Plomb/acide	30-50	75-120	2 V	700	400-1200	5 %
Ni-Cd	45-80	80-150	1,2 V	?	2000	> 20 %
Ni-MH	60-110	220-330	1,2 V	900	1500	> 30 %
Ni-Zn	70-80	120-140	1,65 V	1000	> 1 000	> 20 %
Na-NiCl <sub>2</sub> (ZEBRA)	120	180	2,6 V	200	800	->100%(12%/jour)
Pile alcaline	80-160	?	1,5-1,65 V <sup>[4]</sup>	?	25 à 500	< 0,3 %
Li-ion	150-190	220-330	3,6 V	1500	500-1000	10 %
Li-Po	100-130	?	3,7 V	250	200-300	10 %
Li-PO <sub>4</sub> (lithium phosphate)	120-140	190-220	3,2V	800	2000	5%
LMP (lithium metal polymer)	110	110	2,6V	320	?	?
Li-Air	1500-2500	?	3,4 V	200	?	?

## Batterie au plomb :

La tension nominale dépend du nombre d'éléments, la tension nominale U est égale au nombre d'éléments multiplié par 2,1 V. Généralement on considère qu'un accumulateur au plomb est déchargé lorsqu'elle atteint la tension de 10.8 V).

La capacité de stockage, notée Q, représente la quantité d'énergie disponible (ne pas confondre avec la capacité électrique). Elle s'exprime en ampère-heure. Le courant maximal qu'elle peut fournir pendant quelques instants, ou courant de crête en ampères CCA.

Les valeurs maximales sont données par le constructeur pour une batterie neuve et chargée à 100%, elles varient sensiblement en fonction de l'état de charge, se dégradent en fonction du temps ainsi que de l'usage qui est fait de la batterie.

La batterie au plomb est celle qui a la plus mauvaise puissance massique 35 Wh/kg, après la batterie Nickel-Fer. Mais comme elle est capable de fournir un courant de grande intensité, utile pour le démarrage électrique des moteurs à combustion interne, elle est encore très utilisée en particulier dans les véhicules automobiles.

Les batteries au plomb servent aussi à alimenter toutes sortes d'engins électriques. Les voitures électriques ne se sont toujours pas imposées du fait du mauvais rapport masse/énergie des batteries, bien que le rendement d'un moteur électrique soit exceptionnel.

Ces batteries peuvent servir à stocker de l'énergie produite par intermittence, comme l'énergie solaire ou éolienne.

Les principales causes de dégradation des batteries sont: la sulfatation, la décharge complète, le cyclage, l'oxydation des électrodes, l'oxydation des bornes.

Les constructeurs de batteries indiquent leur durée de vie sous la forme d'un nombre de cycles normalisés de décharge/recharge. À l'issue d'un certain temps de fonctionnement dépendant du nombre et de l'amplitude des cycles, la batterie est usée : l'électrolyte présente un aspect noirâtre.



Batterie au plomb

### Caractéristiques

Énergie/Poids	20-40	Wh/kg
Énergie/Volume	40-100	Wh/l
Rendement charge-décharge	50 %	
Auto-décharge	5%	
Durée de vie	min. 4 à 5 ans	
Nombre de cycles de charge	500 à 1200	
Tension nominale par élément	2.1 V	

## Accumulateur Nickel - Cadmium



Accumulateur nickel-cadmium de PSA, [Museum Autovision, Altlußheim, Allemagne](#)

### Caractéristiques

Energie/Poids	40~60 <u>Wh/kg</u>
Energie/Volume	50~150 Wh/ℓ
Rendement charge-décharge	70~90 %
<u>Auto-décharge</u>	10 % à 20 % /mois
Durée de vie	24 à 36 mois
Nombre de cycles de charge	1500 cycles
<u>Tension</u> nominale par élément	1,2 <u>V</u>

Un accumulateur nickel-cadmium ou Ni-Cd est un accumulateur électrique rechargeable utilisant de l'oxyhydroxyde de nickel et du cadmium comme électrodes. En ce qui concerne les accumulateurs grand public, les batteries Ni-Cd sont aujourd'hui relativement dépassées en termes d'autonomie, et ne sont plus vendues dans l'Union européenne (suite à l'interdiction de l'utilisation du cadmium dans les accumulateurs portables prévue par la directive citée ci-dessus). Elles sont remplacées par les batteries NiMH, elles-mêmes aujourd'hui concurrencées par les batteries Li-ion.

En ce qui concerne les accumulateurs industriels, la situation est quelque peu différente puisque ces accumulateurs conservent des avantages importants par rapport aux autres technologies disponibles. Ils sont en effet d'une grande fiabilité électrique (résistance à la surcharge) et mécanique (résistance aux chocs) et tolèrent une large plage de température (de -50°C à +70°C). De plus ils jouissent naturellement d'une longue durée de vie. C'est pour ces raisons qu'ils sont généralement retenus pour des applications de sécurité où ils contribuent à la protection des personnes et des biens dans des domaines d'utilisation exigeants. Les domaines principaux d'utilisation sont la sécurité aéronautique, la sécurité ferroviaire (il en est de même pour les trains à grande vitesse), la fiabilité des réseaux d'accès difficiles (télécommunication, données et énergie).

### Avantages du NiCd

Charge simple et rapide, même après une longue période de stockage, et notamment à froid.

Grande durée de vie en nombre de cycles de charge et de décharge.

Conserve ses performances à basse température et ne vieillit pas prématurément à haute température.

Résistance interne très faible.

Stockage aisé, quel que soit son niveau de charge.

### Faiblesses du NiCd

Faible densité énergétique.

S'auto-décharge assez rapidement (20 % / mois).

Sensibilité à l'effet mémoire.

Contient des substances dangereuses (6 % de Cd) ce qui implique qu'il doit être collecté en fin de vie pour recyclage.

Coût d'achat plus élevé que la technologie standard.

## Accumulateur nickel-hydrure métallique

### Accumulateur nickel-hydrure métallique



Un accumulateur nickel-hydrure métallique ou NiMH (de l'anglais *nickel-metal hydride*) est un accumulateur électrique rechargeable utilisant de l'hydrure métallique (composé permettant de stocker de l'hydrogène) et de l'oxyhydroxyde de nickel comme électrode.

Les accumulateurs NiMH ont été commercialisés vers 1990 et présentent une énergie volumique supérieure d'au moins 30 % par rapport aux accumulateurs NiCd (Nickel-Cadmium). Ils sont aujourd'hui eux-mêmes dépassés en termes d'énergie massique par les accumulateurs Li-ion (Lithium-ion) et Lithium-Polymère

La technologie NiMH est extrêmement répandue dans les accumulateurs 1,2 V d'usage courant :

Les modèles AA/LR6 dont la capacité peut atteindre 2 700 mAh pour les plus performants ;

Les modèles AAA/LR3 dont la capacité maximale est de 1 000 mAh.

L'avantage, en matière d'environnement, des batteries

Caractéristiques	
Energie/Poids	30 à 80 Wh/kg
Energie/Volume	140 à 300 Wh/l
Rendement charge-décharge	66 %
Auto-décharge	10-15 % par mois, 10-15 % durant les premières 24 h
Durée de vie	24 à 48 mois
Nombre de cycles de charge	500 à 1000
Tension nominale par élément	1,2 V

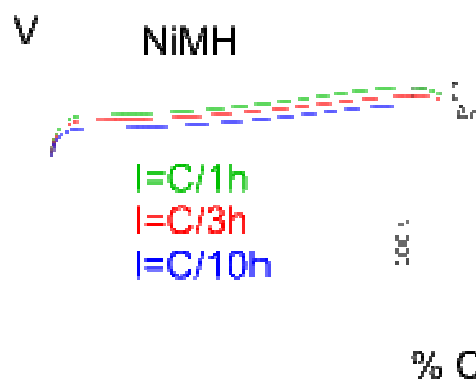
d'accumulateurs NiMH est l'absence de cadmium et de plomb, deux matériaux très polluants. En outre, elles possèdent de meilleures performances et une plus faible sensibilité à l'effet mémoire. Leur fabrication et leur recyclages doivent néanmoins se faire très soigneusement, car l'hydroxyde de potassium est irritant et corrosif pour la peau, les yeux et les voies respiratoires et digestives.

### Points forts du NiMH

Contient beaucoup plus d'énergie que le nickel-cadmium  
Peu sensible à l'effet mémoire  
Simple à stocker et à transporter  
Ne contient pas de cadmium

### Points faibles du NiMH

Ne supporte pas le dépassement de charge  
Détection de fin de charge difficile ( $\Delta v$  très faible)  
Durée de vie plus faible que le nickel-cadmium en nombre de cycles



Batterie Ni-MH de Prius II

En 2010, les batteries NiMH sont le standard pour équiper les voitures hybrides (moteur à combustion + moteur électrique). En effet malgré des performances en retrait par rapport aux batteries à base de lithium, elles gardent l'avantage de bien supporter de forts courants de charge et de décharge et sont beaucoup plus sûres en cas de surchauffe.

La Toyota Prius et la Honda Civic IMA, par exemple, sont toutes deux équipées d'une batterie Panasonic (Matsushita) NiMH, de 1,3 kWh (39 kg pour la première et de 28 kg pour la seconde). Ces batteries sont prévues pour durer toute la durée de vie du véhicule (garanties 8 ans).

En 2005 sont apparus des accumulateurs NiMH à faible auto-décharge, vendus préchargés. Ceux-ci conservent généralement 70 % à 85 % de leur capacité après un stockage d'un an à 20°C. Les accus NiMH normaux perdent quant à eux de 10 à 15 % de leur capacité durant les premières 24h, puis de 10 à 15 % par mois.

Leur faible résistance interne permet un maintien d'une tension plus élevée avec les équipements nécessitant des courants élevés, comme les appareils photo numériques.

### Accumulateur lithium-ion

Une batterie lithium-ion, ou accumulateur lithium-ion est un type d'accumulateur lithium.

Ses principaux avantages sont une énergie massique élevée (deux à cinq fois plus que le nickel-hydrure métallique par exemple) ainsi que l'absence d'effet mémoire. Enfin, l'auto-décharge est relativement faible par rapport à d'autres accumulateurs. Cependant le coût reste important et cantonne le lithium aux systèmes de petite taille. Commercialisée pour la première fois par Sony Energitech, en 1991 la batterie lithium-ion occupe aujourd'hui une place prédominante sur le marché de l'électronique portable.



La batterie lithium-ion est basée sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive, le plus souvent un oxyde de métal de transition lithié (dioxyde de cobalt ou manganèse) et une électrode négative en graphite (sphère MCMB)<sup>2</sup>. L'emploi d'un électrolyte aprotique (un sel LiPF<sub>6</sub> dissous dans un mélange de carbonate d'éthylène, de carbonate de propylène ou de tétrahydrofurane) est obligatoire pour éviter de dégrader les électrodes très réactives.

La tension nominale d'un élément Li-ion est de 3,6 V ou 3,7 V (selon la technologie).

Cette équivalence : 1 élément Li-ion = 3 éléments Ni-MH est intéressante car elle permet parfois une substitution pure et simple (du Li-ion par du Ni-MH uniquement, l'inverse pouvant s'avérer catastrophique). De plus le Ni-MH est d'une utilisation plus sûre, notamment lors de la charge.

Ce problème de sécurité impose d'intégrer un système électronique de protection, embarqué le plus souvent dans chaque élément au lithium il empêche une charge ou décharge trop profonde et permet l'équilibrage des tensions entre éléments dans les batteries constituées de plusieurs éléments en série, à défaut, le danger peut aller jusqu'à l'explosion de la batterie. Les courants de charge et de décharge admissibles sont aussi plus faibles qu'avec d'autres technologies. Par ailleurs, des spécialistes estiment que leur durée de vie serait limitée à environ deux ou trois ans après fabrication.

Cependant, certains accumulateurs Li-ion industriels de grande puissance (plusieurs centaines de watts par élément) durent jusqu'à 15 ans, grâce à une chimie améliorée et une gestion électronique optimisée. Ils sont utilisés en aéronautique, dans les véhicules hybrides, les systèmes de secours, les navires... Les sondes spatiales Galileo par exemple sont équipés de batteries Li-ion prévues pour douze ans<sup>4</sup>. L'utilisation de la technique Li-ion à ces échelles de puissance n'en était qu'à ses débuts dans les années 2000.

#### **Avantages des accumulateurs lithium-ion**

Ils possèdent une haute densité d'énergie pour un poids très faible, grâce aux propriétés physiques du lithium (très bon rapport poids/ potentiel électrique). Ces accumulateurs sont donc très utilisés dans le domaine des systèmes embarqués.

Ils ne présentent aucun effet mémoire contrairement aux accumulateurs à base de nickel.

Ils ont une faible auto-décharge (10 % par mois voire souvent moins de quelques % par an).

Ils ne nécessitent pas de maintenance.

Ils peuvent permettre une meilleure sécurité que les batteries purement *lithium*, mais ils nécessitent toujours un circuit de protection.

#### **Faiblesses des accumulateurs lithium-ion**

La profondeur de décharge : ces batteries vieillissent moins vite lorsqu'elles sont rechargées par des recharges partielles que lorsqu'elles supportent des cycles complets de décharge/ recharge<sup>5</sup>.

Les éléments lithium-ion sont passivés par construction (par exemple par dépôt d'un mince film de chlorure de lithium sur l'anode) afin de les protéger contre l'auto-décharge pendant le stockage et la corrosion. Cependant, cette passivation peut avoir des inconvénients car, en augmentant la résistance interne de l'élément, elle génère une chute de tension lors de l'utilisation (au début de l'application de la charge). Ceci est d'autant plus sensible que le courant demandé par la charge est élevé, ce qui peut conduire à l'intervention du circuit de protection qui coupe alors le circuit si la tension par élément descend en dessous de 2,5 V. Cette résistance de la couche de passivation augmente avec de la durée et la température de stockage (les températures élevées augmentent la passivation). D'autre part, cet effet est accentué si la température de décharge est basse et augmente avec les cycles de d'utilisation. Mais l'amplitude du phénomène est aussi fonction de la conception chimique qui n'est pas la même selon les fabricants<sup>6</sup>.

Les courants de charge et de décharge admissibles sont plus faibles qu'avec d'autres techniques.

Il peut se produire un court-circuit entre les deux électrodes par croissance dendritique de lithium.

L'utilisation d'un électrolyte liquide présente des dangers si une fuite se produit et que celui-ci entre en contact avec de l'air ou de l'eau (transformation en liquide corrosif : l'hydroxyde de lithium).

Cette technique mal utilisée présente des dangers potentiels : elles peuvent se dégrader en chauffant au-delà de 80 °C en une réaction brutale et dangereuse. Il faut toujours manipuler les accumulateurs lithium-ion avec une extrême précaution, ces batteries peuvent être explosives. Et comme avec tout accumulateur : ne jamais mettre en court-circuit l'accumulateur, inverser les polarités, surcharger ni percer le boîtier.

Pour éviter les problèmes, ces batteries doivent toujours être équipées d'un circuit de protection, d'un circuit de régulation (le BMS, *Battery Management System*), d'un fusible thermique et d'une soupape de sécurité. Elles doivent être chargées en respectant des paramètres très précis et ne jamais être déchargées en dessous de 2,5 V par élément.

Enfin, les accumulateurs Li-ion ne doivent pas être confondus avec les piles Lithium qui ne sont pas rechargeables, la confusion est entretenue par un terme anglophone commun *Battery*.