

Chapitre 4 : stockage d'énergie électrique

I. Introduction

Le stockage d'énergie électrique est un domaine crucial dans le contexte des énergies renouvelables et de la transition énergétique. Il s'agit de capturer l'énergie produite à un moment donné pour l'utiliser ultérieurement. Cette capacité à stocker l'énergie est essentielle pour surmonter les intermittences de sources renouvelables comme le solaire et l'éolien, qui ne produisent pas d'énergie de manière constante.



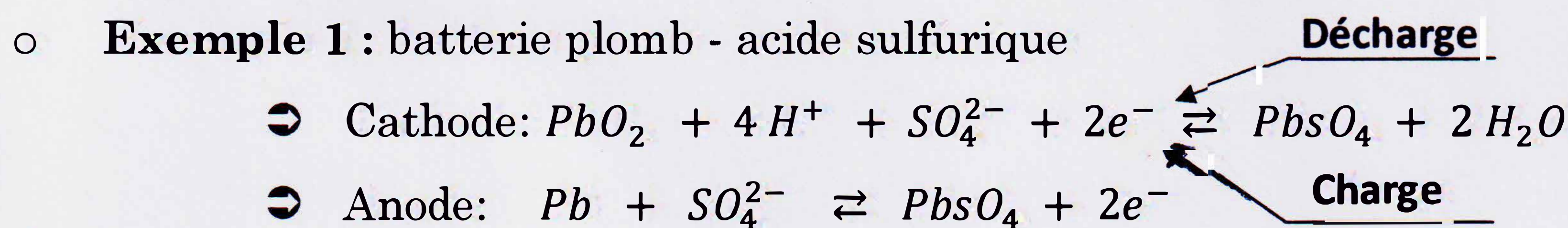
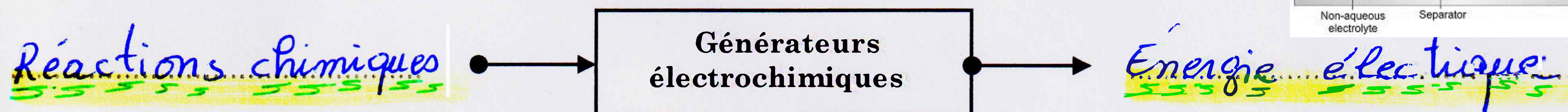
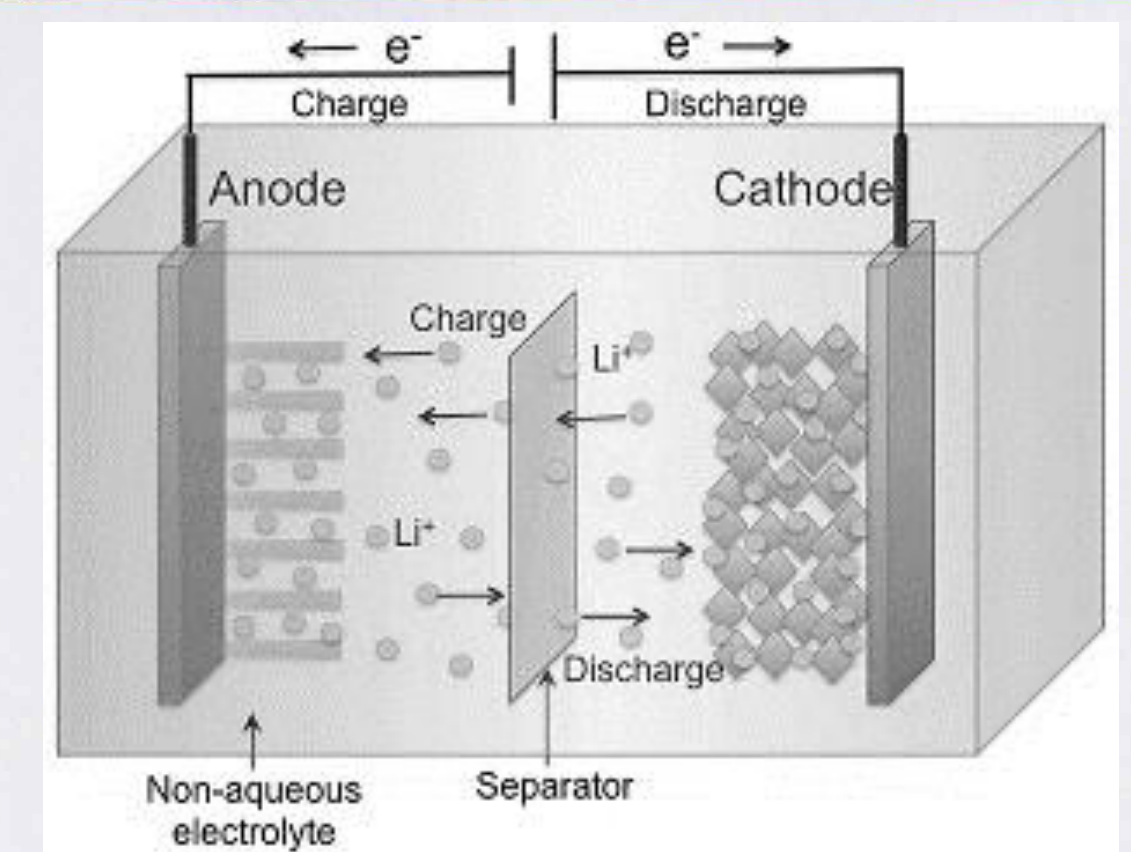
Il existe plusieurs technologies permettant de stocker de l'énergie électrique, parmi lesquelles on peut citer :

- Le stockage électrochimique (batteries)
- Le stockage électrostatique (supercondensateurs)
- Le stockage inertiel
- Le stockage par pompage
- Le stockage thermique, etc.

Dans ce cours, nous nous limiterons à l'étude du stockage de l'énergie électrique par des moyens électrochimiques (piles, accumulateurs et batteries) et électrostatiques (supercondensateurs).

II. Générateurs électrochimiques

Les générateurs électrochimiques convertissent l'énergie chimique en énergie électrique via des réactions chimiques. Ils incluent les piles, les accumulateurs et les batteries, utilisés dans divers appareils électroniques et véhicules électriques.



1. Différents types de générateur électrochimique

➔ Piles et accumulateurs



Piles boutons Lithium
1,5 V – 50 à 125 mAh



Accumulateurs Ni-Cd
1,2 V – 250 à 1700 mAh



Piles alcalines
1,5 à 9 V – 550 à 2200 mAh

➔ Batteries



Batterie Plomb-Acide
12 V – 5,8 Ah – 150 Ah



Batterie Ni-Cd
4,8 V – 650 mAh



Batterie Li-Po
3,7 V – 550 à 2000 mAh

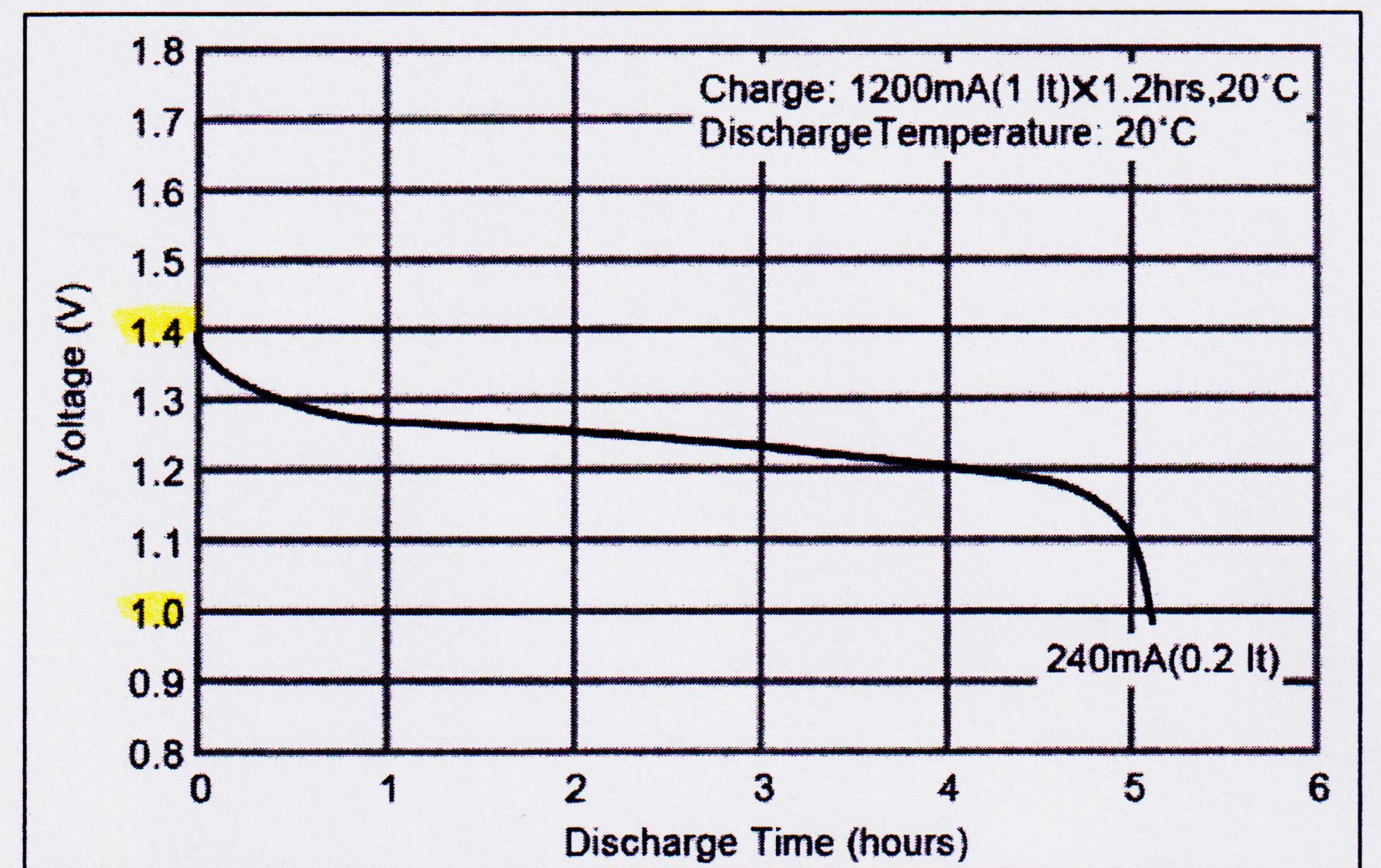
Remarque : Les accumulateurs produisent du courant continu avec une différence de potentiel ou tension relativement faible (1 à 3 V). Pour obtenir une tension plus élevée, ils doivent être **associés en série**. Une batterie désigne un ensemble d'accumulateurs électriques **raccordés en série** pour augmenter la tension ou **en parallèle** pour augmenter la capacité ou fournir plus de courant. Contrairement aux piles, les accumulateurs sont rechargeables.

2. Caractéristiques d'un générateur électrochimique

○ **Tension nominale**

En termes de Volts, la tension nominale U est la moyenne de la tension observée aux bornes d'une batterie ou d'un accumulateur pendant la majeure partie de sa décharge.

La courbe ci-contre, pour une batterie Nickel-Métal-Hydrure HHR120AA. Trouver :



- Tension nominale : $U = \frac{1.4 + 1}{2} \Rightarrow U = 1.2 V$
- Courant de décharge : $I_c = 240 mA$
- Durée de décharge (autonomie) : $\Delta t = 5.2 h$

○ **Capacité nominale du Batterie**

La capacité, notée C ou parfois Q, correspond à la quantité totale d'électricité qu'une batterie ou un accumulateur peut délivrer lors d'une décharge complète, et elle est mesurée en Ah ou mAh, elle s'exprime par : $C = I \cdot \Delta t$ (Δt représente l'autonomie de la batterie en h).

Remarque : La capacité réelle de la batterie n'est pas une valeur constante et est principalement influencée par le courant de décharge.

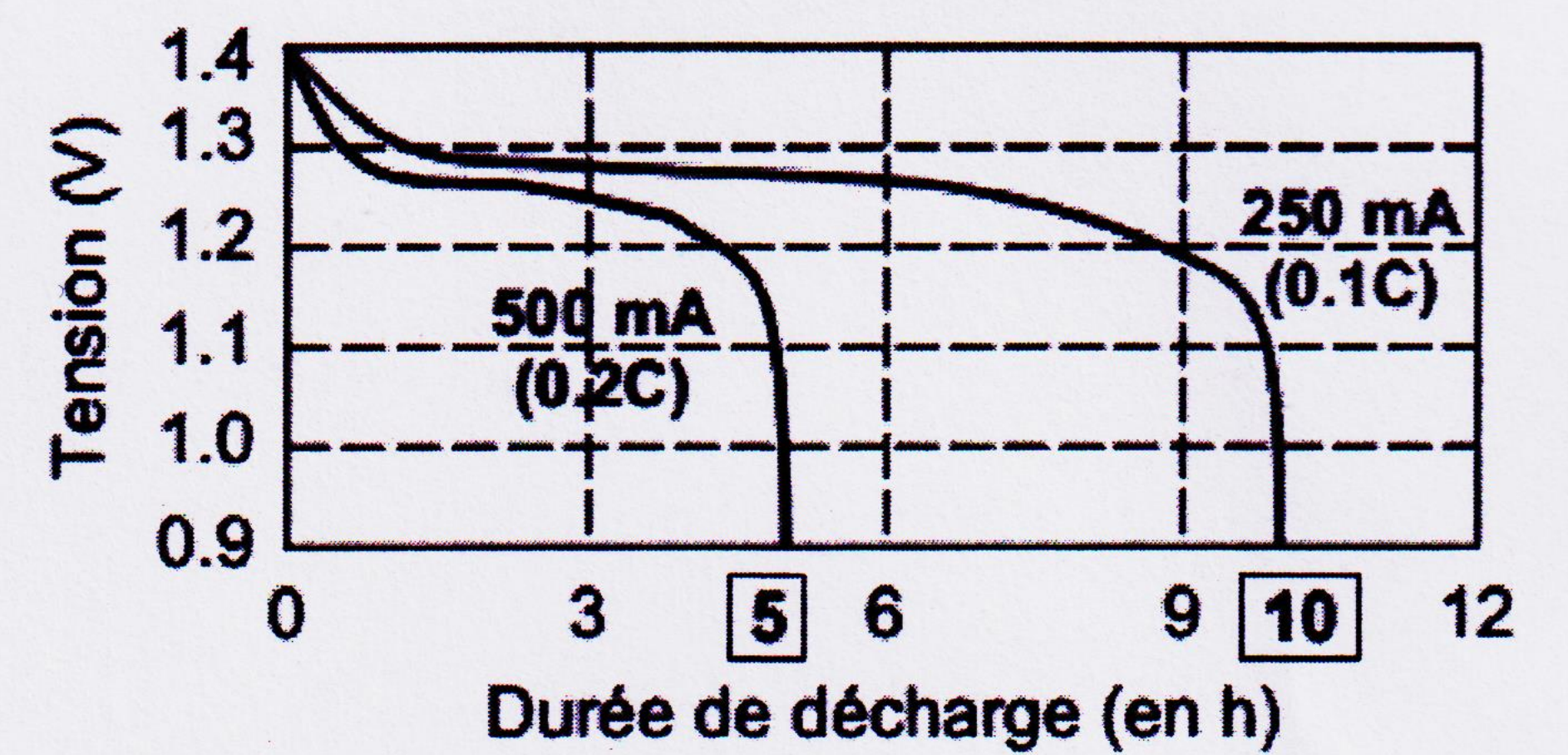
Exemple 2 : Les caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Metal Hydrure



Les caractéristiques du constructeur :

- Système chimique : Nickel-Metal Hydrure
- Désignation : IEC-HR6
- Capacité nominale : 2500 mAh

Courbes caractéristiques de décharge (Température 25°C)



○ **Question 1 :** À partir de la courbe de décharge, trouvez la tension nominale de cet accumulateur.

pour les deux courbes : $U = \frac{1.4 + 1}{2} \Rightarrow U = 1.2 V$

○ **Question 2 :** Pour un courant de 250 mA, calculez la durée de décharge Δt .

pour $I = 250 mA \Rightarrow \Delta t = 10 h$

○ **Question 3 :** Exprimez et calculez la capacité nominale C. Comparez ensuite la valeur obtenue avec les spécifications du constructeur.

on a : $C = I \cdot \Delta t \Rightarrow C = 2500 mA \Rightarrow$ même valeur des caractéristiques fournit par le constructeur

On définit la capacité nominale C_{10} et C_{20} :

- Capacité C_{10} : La batterie décharge avec un courant constant I_{10} à 25 °C pendant 10 heures.
- Capacité C_{20} : La batterie décharge avec un courant constant I_{20} à 25 °C pendant 20 heures.

○ **Densité énergétique**

La densité énergétique d'une batterie est la quantité d'énergie stockée par unité de volume ou de masse, mesurée en Wh/L (watts-heure par litre) ou Wh/kg (watts-heure par kilogramme).


$$Densité_énergétique(Wh/L) = \frac{E(Wh)}{V(L)} \quad Ou \quad Densité_énergétique(Wh/Kg) = \frac{E(Wh)}{m(Kg)}$$

Pour Lithium-ion : Environ 250 Wh/kg et Plomb-acide : Environ 40 Wh/kg

Exemple 3 :

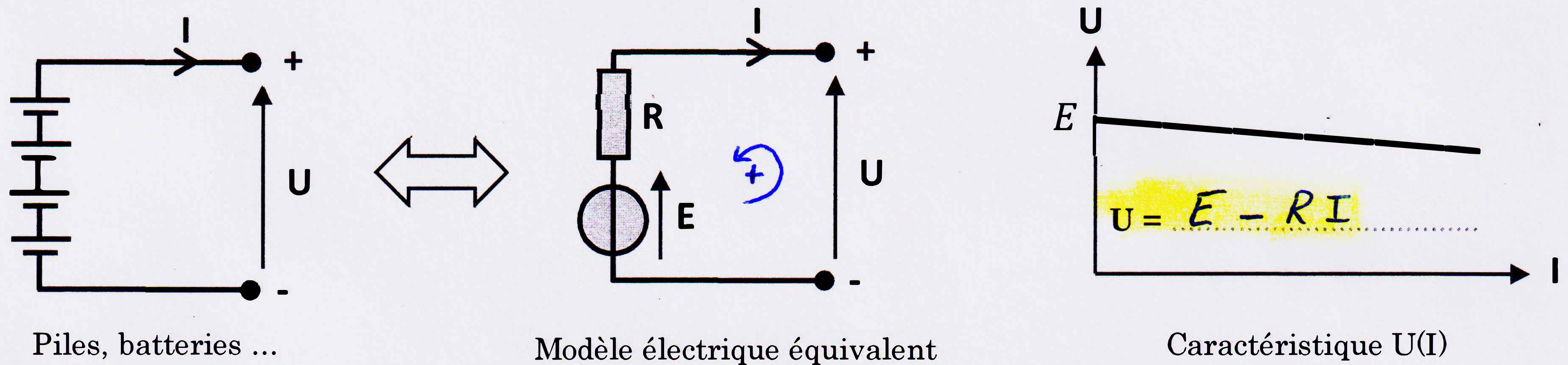
Calcul de l'énergie massique d'un accumulateur Ni-MH

Tension 1,2 V- capacité 1500 mAh- masse 25 g.

On a : $D.E = \frac{E}{m} \Rightarrow D.E = \frac{U.C}{m}$  $\Rightarrow DE = 72 Wh/kg$

○ **Modèle électrique d'un générateur électrochimique**

Le modèle le plus simple de générateur électrochimique est le modèle statique (E, R) à paramètres constants, qui implémente l'équation : $U = E - R.I$.



Remarque : Les fabricants cherchent à **réduire la résistance interne** des accumulateurs pour améliorer l'efficacité énergétique, les performances, la durée de vie, la gestion de la température et permettre une charge plus rapide, tout en réduisant les pertes de chaleur et le risque de surchauffe.

III. Générateur électrostatique : supercondensateur

Les supercondensateurs, ou ultracondensateurs, stockent l'énergie électrostatiquement, permettant des cycles rapides de charge et décharge, contrairement aux batteries. Ils offrent une capacité de stockage d'énergie plus élevée que les condensateurs traditionnels et une densité de puissance élevée. Utilisés dans les véhicules électriques, les dispositifs de sauvegarde d'énergie, et les énergies renouvelables, ils sont prisés pour leur efficacité et leur longue durée de vie.



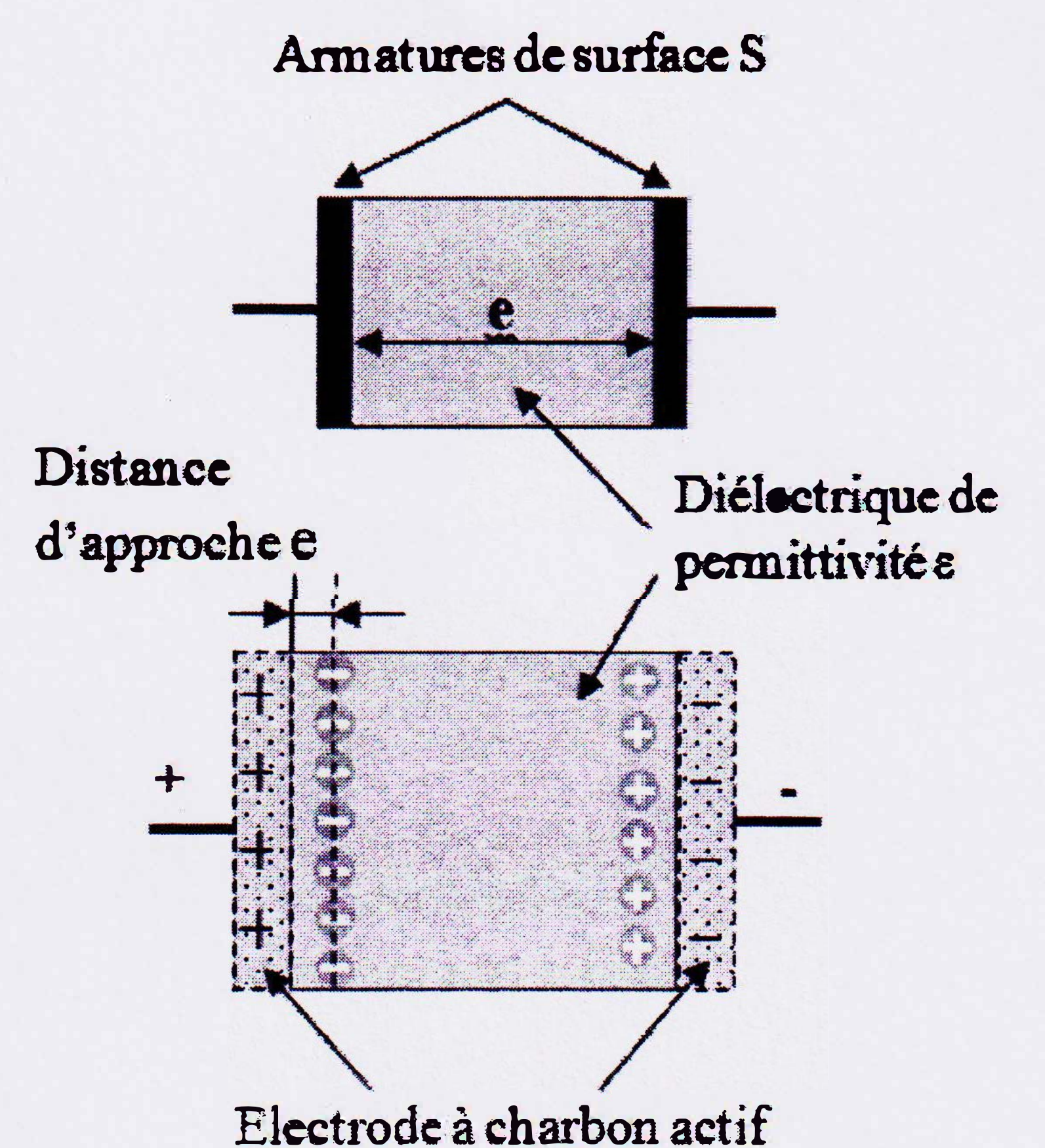
1. Principe

Les supercondensateurs ont des électrodes en carbone actif ou graphène pour une haute conductivité et surface spécifique, un électrolyte (liquide, solide ou gel) pour le transfert de charges, et un séparateur pour prévenir les courts-circuits tout en permettant le passage des ions. Ces matériaux et structures optimisent la performance et la capacité de stockage d'énergie.

2. La capacité d'un supercondensateur

La capacité d'un condensateur est déterminée essentiellement par la géométrie des armatures et la nature de l'isolant (diélectrique) les séparant : $C = \epsilon \frac{S}{e}$ (C en Farad)

Avec : S surface des armatures, e épaisseur du diélectrique et ϵ permittivité du diélectrique



3. Relations et Concepts pratique

⇒ Énergie Stockée

L'énergie stockée par un supercondensateur est définie par la formule suivante : $E = \frac{1}{2} C \cdot V^2$.

Où E est l'énergie en joules (J), C est la capacité en farads (F), et V est la tension en volts (V).

⇒ Temps de Charge/Décharge

Temps de Charge/Décharge d'un supercondensateur est définie par : $I = C \frac{dV}{dt}$.

Où I est le courant en ampères (A), dV est la variation de tension en volts (V), et dt est la variation de temps en secondes (s).

⇒ Densité énergétique

La densité énergétique est définie par la relation suivant : **Densité_énergétique** = $\frac{E}{\text{Volume ou Masse}}$ où E est l'énergie en joules (J).

⇒ Densité de puissance

La densité de puissance est la mesure de la quantité de puissance qu'un supercondensateur peut délivrer par unité de volume ou de masse. Elle est exprimée en watts par kilogramme (W/kg) ou en watts par litre (W/L) et indique la rapidité avec laquelle un supercondensateur peut fournir de l'énergie. Il définit par :

$$\text{Densité de puissance} = \frac{P}{\text{Volume ou Masse}} \quad \text{Où P est la puissance en watts (W).}$$

Exemple 4 : Calculer l'Énergie et le Temps de Décharge

Un supercondensateur a une capacité de 100 F et est chargé à une tension de 2,5 V.

- **Question 1 :** Calculer l'énergie stockée dans le supercondensateur.

$$\text{On a : } E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \Rightarrow E = 312,5 \text{ J}$$

- **Question 2 :** Déterminer le temps nécessaire pour décharger complètement le supercondensateur avec un courant constant de 2 A.

$$\text{On a : } I = C \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{C \cdot U}{I} \Rightarrow \Delta t = 125 \text{ s}$$

4. Comparaison entre des différents systèmes de stockage

	Condensateurs	Supercondensateurs	Batteries
Densité de puissance (W/kg)	< 100 000	< 10 000	< 1000
Densité d'énergie (Wh/kg).....	< 0.1	1 à 10	10 à 150
Durée de vie (cycle).....	> 500 000	> 500 000	1000
Durée de la charge normale.....	10^{-6} à 10^{-3} s	1 à 30 s	1 à 5 h
Durée de la décharge normale.....	10^{-6} à 10^{-3} s	1 à 30 s	0.3 à 3 h
Rendement charge/décharge (%).....	> 95%	85% à 98%	70 % à 85%

Les supercondensateurs se positionnent entre les batteries et les condensateurs. Leur densité d'énergie est bien plus élevée que celle des condensateurs. Par contre, l'énergie stockée est 10 fois plus faible que l'énergie stockée dans une batterie.

5. Domaines d'application

Les supercondensateurs sont utilisés dans divers domaines grâce à leur capacité de charge et de décharge rapides. Ils sont couramment employés dans les systèmes de récupération d'énergie, comme les freins régénératifs des véhicules électriques, et dans les dispositifs de stockage d'énergie pour les équipements électroniques portables. De plus, ils trouvent des applications dans les systèmes de secours d'urgence et les réseaux électriques pour stabiliser les fluctuations de puissance.