

Source d'énergie continue

**I. Introduction**

La part de l'électricité, dans le mix mondial d'énergie finale, progresse à un rythme rapide qui devrait se poursuivre dans les années à venir. L'électricité apparaît, en outre, comme un vecteur fondamental de développement, porteuse d'un fort potentiel pour un développement humain soutenable. En effet, elle permet la conversion de toutes les ressources primaires, et tout particulièrement les renouvelables, elle permet également l'accès à tous les services, en premier lieu les plus indispensables. Dans un contexte de nécessaire baisse des émissions de gaz à effet de serre, d'accroissement de l'indépendance énergétique, de diminution de consommation de ressources fossiles (...).

Il s'agit d'augmenter la pénétration des sources variables et incertaines issues des ressources primaires renouvelables, de très loin les plus abondantes (rayonnement solaire et vent) et de réduire les besoins en centrales thermiques d'appoint (idéalement alimentées avec des combustibles renouvelables) lors des périodes d'insuffisance de production relativement à la demande.

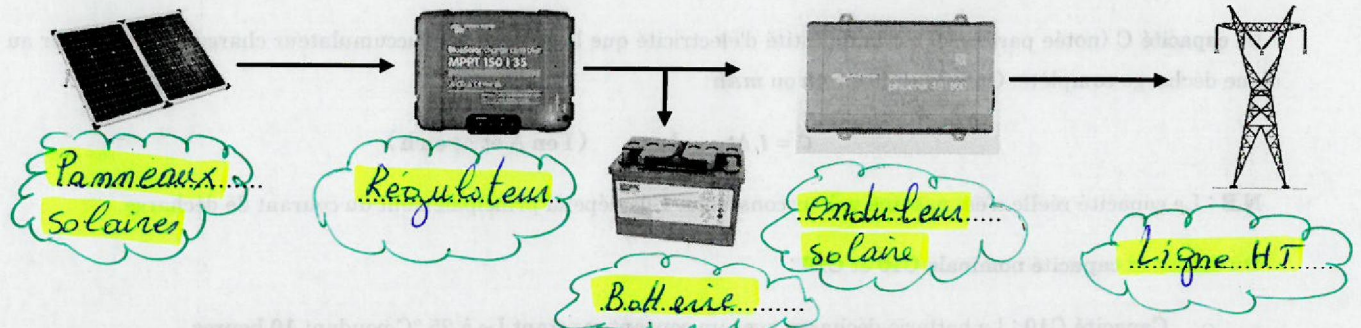
**II. Stockage de l'énergie électrique**

Le stockage de l'énergie est utilisé pour répondre à deux besoins :

- o **Le besoin d'autonomie**, le besoin de se déplacer avec sa propre source d'énergie.



- o **Le besoin de compenser**, le décalage temporel entre la demande en énergie et la possibilité de production. C'est le problème lorsqu'on utilise des énergies renouvelables.



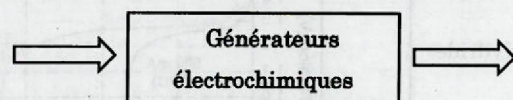
Dans ce cours on se limite à étudier le stockage de l'énergie électrique par le **stockage électrochimique** (piles, accumulateurs et les batteries) et par le **stockage électrostatique** (supercondensateurs).

**1. Générateurs électrochimiques**

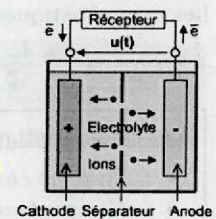
**1.1. Principe**

Les termes **piles**, **accumulateurs**, **batteries** désignent des dispositifs dont la fonction est de transformer directement, l'énergie libérée par une réaction chimique en énergie électrique.

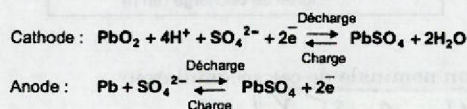
Réactions chimiques



Énergie électrique



**Exemple :** batterie plomb - acide sulfurique





### 1.2. Différents types de générateur électrochimique

○ Piles et accumulateurs



**Piles boutons Lithium**  
1.5V - 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

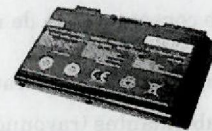
○ Batteries



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



**Batterie Ni-Cd**  
4,8 V - 650 mAh



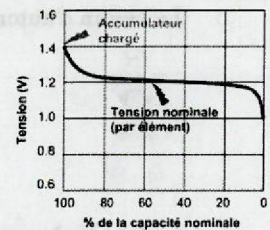
**Batterie Li-Po**  
3,7 V - 550 à 2000 mAh

### 1.3. Grandeurs caractéristiques

#### 1.3.1. Tension nominale

La **tension nominale U** (Unité : Volt) est la tension moyenne aux bornes d'une batterie ou d'un accumulateur observée sur la plus grande partie de sa courbe de décharge.

La tension nominale de cette batterie est :  $V = 1,2 V$



#### 1.3.2. Capacité nominale du Batterie

La **capacité C** (notée parfois Q) est la quantité d'électricité que la batterie ou l'accumulateur chargé peut restituer au cours d'une décharge complète. On l'exprime en **Ah** ou **mAh**

$$C = I \cdot \Delta t \quad \text{Avec} \quad (I \text{ en A et } \Delta t \text{ en h})$$

**N.B :** La capacité réelle n'est pas une valeur constante. Elle dépend principalement du courant de décharge.

On définit la **capacité nominale C10** et **C20** :

- **Capacité C10** : La batterie décharge avec un **courant constant I<sub>10</sub>** à 25 °C pendant **10 heures**
- **Capacité C20** : La batterie décharge avec un **courant constant I<sub>20</sub>** à 25 °C pendant **20 heures**

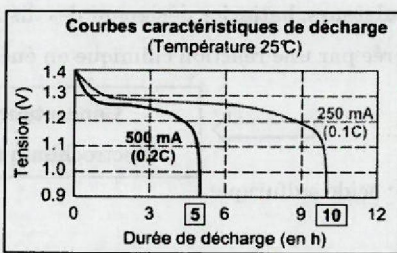
#### Exercice 1 :

Les caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Metal Hydride sont les suivantes :



**Les caractéristiques du constructeur :**

- **Système chimique** : Nickel-Metal Hydride
- **Désignation** : IEC-HR6
- **Tension nominale** : 1.2V
- **Capacité nominale** : 1500 mAh



1. A partir de la courbe de décharge, déterminer la tension nominale de cet accumulateur

d'après le graphique de décharge :  $U = 1,2 V$



2. Déterminer le courant de décharge si le courant est de 250 mA et ainsi la durée de décharge  $\Delta t$

le courant de décharge :  $I = 250 \text{ mA}$ , la durée de décharge :  $\Delta t = 10 \text{ h}$

3. Exprimer puis calculer la capacité nominale C. Comparer la valeur trouvée avec les données de constructeur.

la capacité de la batterie :  $C = I \cdot \Delta t \Rightarrow C = 2500 \text{ mAh}$ , cette valeur est identique à la valeur donnée par le document constructeur

1.3.3. Densité énergétique

L'énergie stockée s'écrit :  $W_{bat} = C \cdot U = U \cdot I \cdot \Delta t$  (Unité : Wh)

Il est également intéressant d'avoir l'ordre de grandeur de la densité énergétique d'une batterie.

C'est la quantité d'énergie stockée par unité de masse ou de volume (Unités : Wh/kg ou Wh/l).

Exercice 2 :

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

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

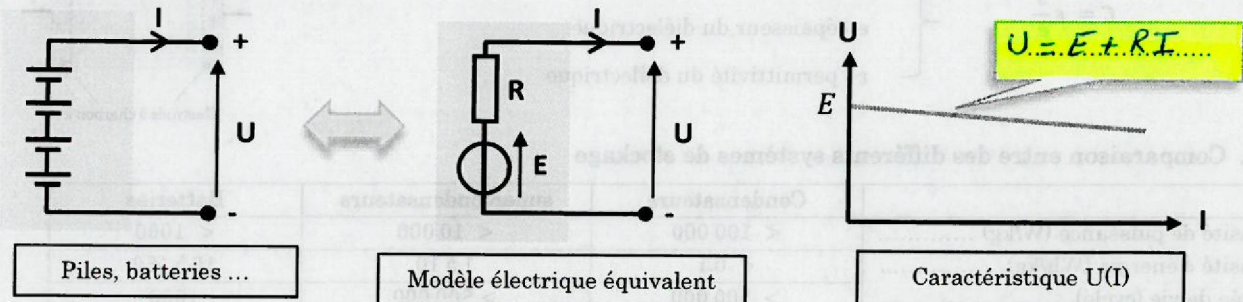


Energie massique =  $\frac{\text{Energie stockée}}{\text{Masse}} \Rightarrow E_m = \frac{C \cdot U}{m}$  avec  $m = 25 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$

Donc :  $E_m = 72 \text{ Wh/kg}$

1.4. 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  $U = E - RI$ .



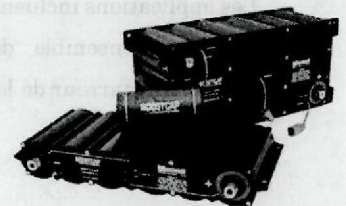
Les fabricants de batteries cherchent à obtenir une résistance interne la plus faible possible (5 mΩ et 50 mΩ contre 1 Ω pour les piles), pour :

Diminuer les pertes en puissance (pertes Joules) lorsque le courant d'opel est trop important :  $I \uparrow \Rightarrow P_g = RI^2$

2. Générateurs électrostatique : supercondensateurs

Les supercondensateurs constituent une nouvelle technologie de stockage, d'énergie spécifique supérieure à celle des condensateurs usuels, et de puissance spécifique supérieure à celle des accumulateurs électrochimiques.

- o Les supercondensateurs se situent donc entre les condensateurs traditionnels et les batteries,
- o Les supercondensateurs à couche double électrique présentent une durée de vie élevée, conséquence d'un mode de fonctionnement électrostatique.



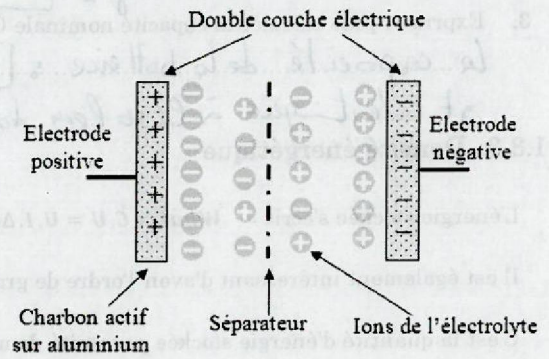


**2.1. Principe**

Le supercondensateur est constitué de deux électrodes poreuses, généralement en charbon actif et imprégnées d'électrolyte, qui sont séparées par une membrane isolante et poreuse pour assurer la condition ionique (séparateur).

Le stockage d'énergie pour les supercondensateurs n'est pas réalisé grâce à un transfert de charges (comme pour les batteries) mais grâce aux interactions électrostatiques entre les ions de l'électrolyte liquide et les charges électroniques à la surface des électrodes. Lorsqu'une tension est appliquée entre les deux électrodes, les ions de l'électrolyte, sous l'influence du champ électrique, se dirigent vers l'électrode comportant des charges de signe opposé.

Les charges (électroniques du côté de l'électrode solide et ioniques du côté de l'électrolyte liquide) vont donc s'accumuler de part et d'autre des interfaces entre chaque électrode et l'électrolyte.



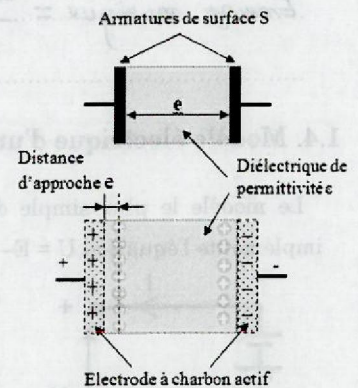
**2.2. La capacité C des supercondensateurs**

La capacité d'un condensateur est déterminée essentiellement par la géométrie des armatures et la nature de l'isolant (diélectrique) les séparant.

La valeur de sa capacité C (en Farad) est donnée par la relation suivante :

$$C = \epsilon \frac{S}{e}$$

$\left\{ \begin{array}{l} S : \text{surface des armatures} \\ e : \text{épaisseur du diélectrique} \\ \epsilon : \text{permittivité du diélectrique} \end{array} \right.$



**2.3. 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 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-3</sup> s	1 à 30 s	1 à 5 h
Durée de la décharge normale.....	10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-3</sup> 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.

**2.4. Domaines d'application**

Les applications incluent la voiture électrique (comme tampon d'énergie entre le variateur de vitesse et les batteries), mais également l'ensemble des cas de stockage d'énergie électrique avec des conditions climatiques extrêmes (par exemple : démarreur de locomotives, contrôle d'orientation des pales des éoliennes).