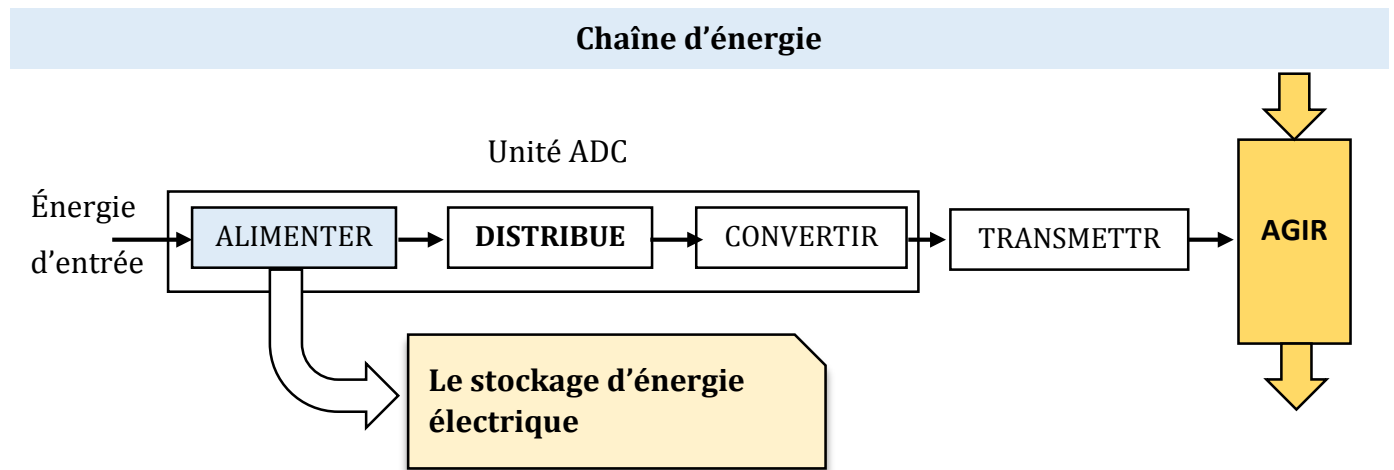


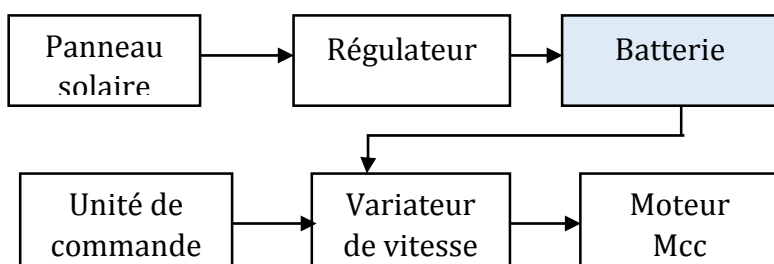
La part de l'électricité, dans le mix mondial d'énergie finale, progresse à un rythme rapide qui devrait se poursuivre dans les années à venir. L'électricité apparaît, en outre, comme un vecteur fondamental de développement, porteuse d'un fort potentiel pour un développement humain soutenable. En effet, 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.

Le stockage de l'énergie électrique doit ainsi permettre d'accroître significativement le taux de pénétration des moyens de production renouvelable variable (photovoltaïque et éolien) dans les réseaux électriques, ceci dans un contexte de marchés de l'énergie ouverts et donc concurrentiels. Il autorise également l'îlotage de consommateurs/producteurs en situation de dysfonctionnement du réseau. Le but étant d'obtenir une alimentation en électricité plus sûre et plus robuste et, in fine, un système électrique plus résilient que le présent.

Dans l'architecture fonctionnelle générique d'un système pluritechnologique, le stockage d'énergie assure la fonction « **ALIMENTER** » de la chaîne d'énergie



Exemple : voiture solaire



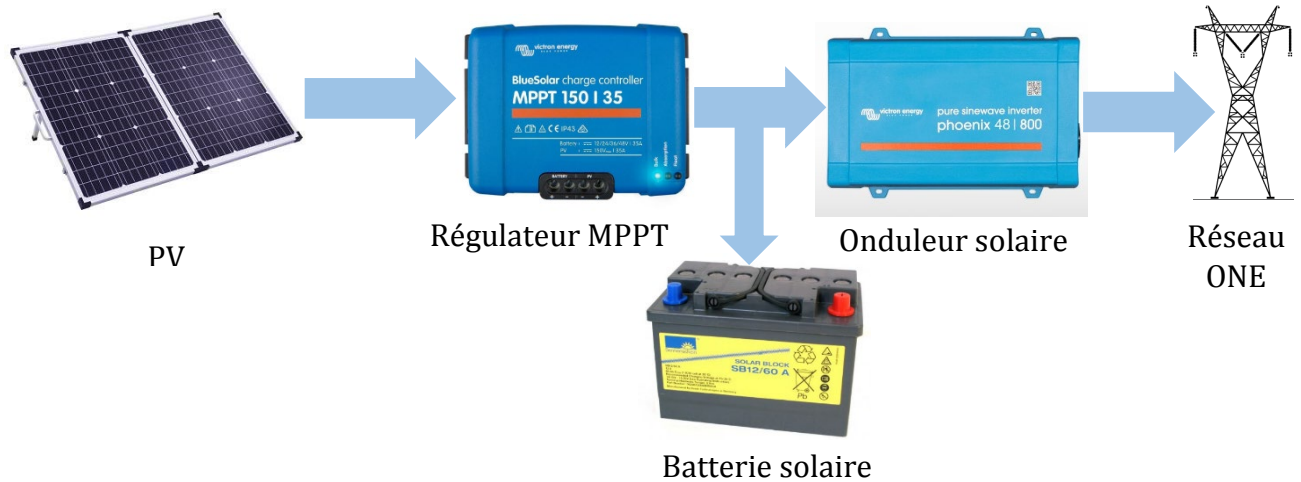
I. Généralité

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

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



- **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.

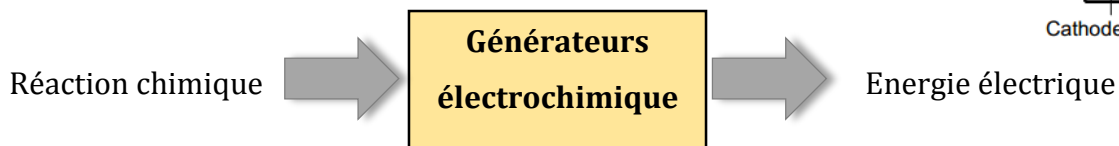
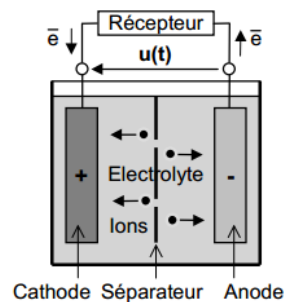


Dans ce cours on se limite à étudier le stockage de l'énergie électrique par le stockage électrochimique (piles, accumulateurs et les batteries) et par le stockage électrostatique (supercondensateurs).

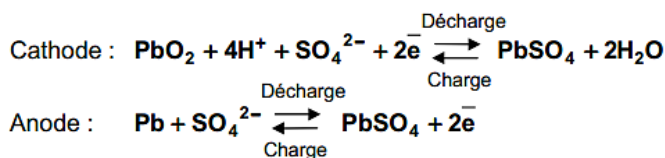
II. Générateurs électrochimiques

2.1. 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.



Exemple : batterie plomb - acide sulfurique



2.2. 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

○ Batteries



Batterie Plomb-Acide

12 V – 5,8 Ah – 150 Ah



Batterie Ni-Cd

4,8 V – 650 mAh



Batterie Li-Po

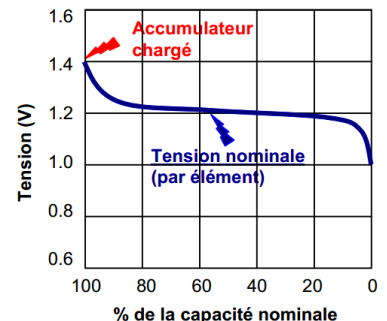
3,7 V – 550 à 2000 mAh

2.3. Grandeurs caractéristiques

2.3.1. 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 est : $V = 1.2 V$



2.3.2. 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 C_{10} et C_{20} :

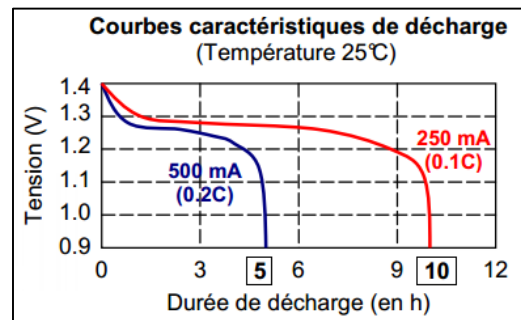
- **Capacité C_{10}** : La batterie décharge avec un courant constant I_{10} à 25 °C pendant **10 heures**
- **Capacité C_{20}** : La batterie décharge avec un courant constant I_{20} à 25 °C pendant **20 heures**

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 du courbe de décharge, déterminer la tension nominale cet accumulateur
2. Déterminer le courant de décharge si le courant est 250 mA et la durée de décharge Δt
3. Exprimer puis calculer la capacité nominale C . Comparer la valeur trouvée avec les données de constructeur.

2.3.3. 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).

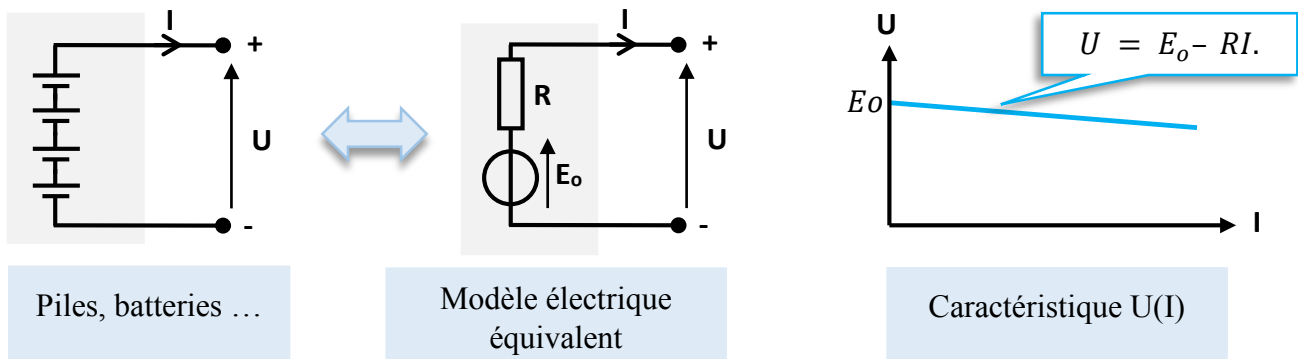
Exercice 2 :

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

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

**2.4. Modèle électrique d'un générateur électrochimique**

Le modèle le plus simple de générateur électrochimique est le modèle statique (E_0, R) à paramètres constants, qui implémente l'équation $U = E_0 - RI$.



Piles, batteries ...

Modèle électrique équivalent

Caractéristique $U(I)$

Les fabricants de batteries cherchent à obtenir une résistance interne la plus faible possible (5 m Ω et 50 m Ω contre 1 Ω pour les piles), **pour diminuer les pertes de puissance (pertes joule) lorsque le courant d'appel est important.**

III. Générateurs électrostatique : supercondensateurs

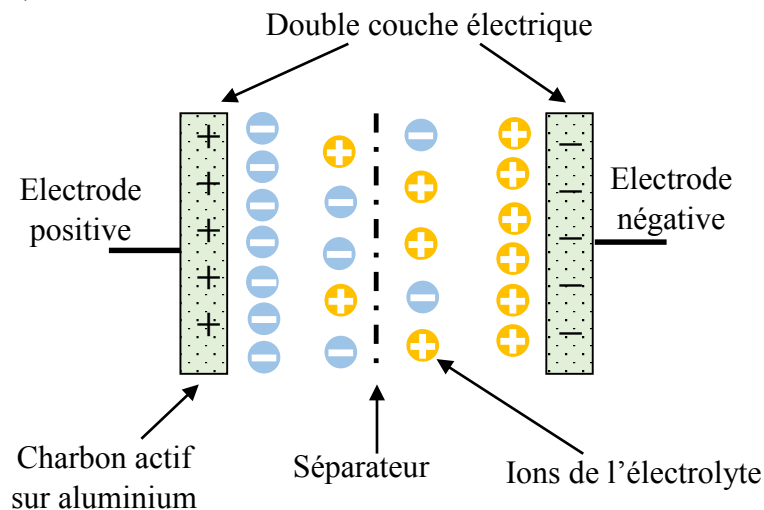
Les supercondensateurs constituent une nouvelle technologie de stockage, d'énergie spécifique supérieure à celle des condensateurs usuels, et de puissance spécifique supérieure à celle des accumulateurs électrochimiques.

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



3.1. Principe

Le supercondensateur est constitué de deux électrode poreuse, 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.

3.2. 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.

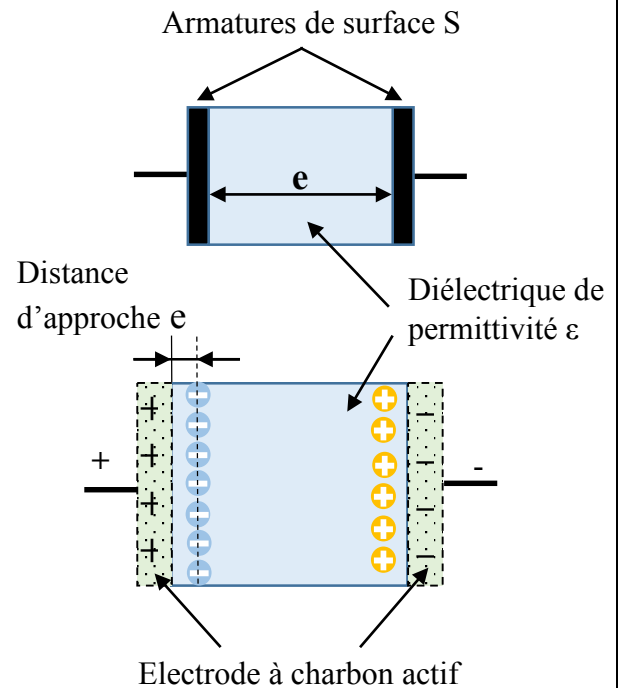
La valeur de sa capacité C (en Farad) est donnée par la relation suivante :

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

S : surface des armatures
 e : épaisseur du diélectrique
 ϵ : permittivité du diélectrique

Dans les supercondensateurs, la surface des électrodes est recouverte avec du **charbon actif**, matériau microporeux fournissant une surface S considérable pour que les ions s'y accrochent.

De plus, les molécules de solvant organique jouant le rôle de diélectrique, l'épaisseur d'isolant e (distance d'approche) est très faible (inférieur au nanomètre). On peut ainsi obtenir des valeurs **très élevée de capacité (1 à 5000 F)**.



3.3. 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^{-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.

3.4. 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 : **démarrateur de locomotives, contrôle d'orientation des pales des éoliennes**).

Références :

- [1] C. François, Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016
- [2] H.H. MOLINARO, B. MULTON, Introduction au stockage de l'énergie électrique :France , 2019,
<https://eduscol.education.fr/>
- [3] SI-Cours-stockage de l'énergie.docx : https://disciplines.ac-toulouse.fr/sii/sites/sii/files/specialite_si/ressources_pedagogiques_reforme_2019/niveau_premiere_reforme_2019/sequence1b/3-stockagedel_energie.pdf
- [4] Supercondensateur : <http://www.composelec.com/supercondensateur.php>