

1. Pourquoi stocker de l'énergie ?

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

- Le besoin de se déplacer avec sa propre source d'énergie, c'est le besoin d'autonomie.
- Le besoin de compenser le décalage temporel entre la demande en énergie et la possibilité de production.
- Le besoin de compenser les fluctuations d'intensité du courant délivré sur le réseau électrique, par exemple dans le cas des éoliennes.



2. Le stockage électrochimique d'énergie électrique

L'électricité ne peut pas être stockée directement. Il est donc indispensable de convertir l'énergie sous d'autres formes afin de la stocker.

L'utilisation de batteries permet de stocker l'énergie électrique sous forme électrochimique.

Les 3 grandeurs principales qui caractérisent les batteries sont :

- **La tension** ou différence de potentiel aux bornes de la batterie. Elle s'exprime en volts (V).
- **La capacité** de la batterie représente la quantité de charges électriques qu'elle peut stocker. Elle s'exprime en Coulombs (C) ou en Ampère-heure (Ah). $1\text{Ah} = 3600\text{C}$.

La capacité est souvent rapportée à la masse (capacité massique) ou au volume (capacité volumique).

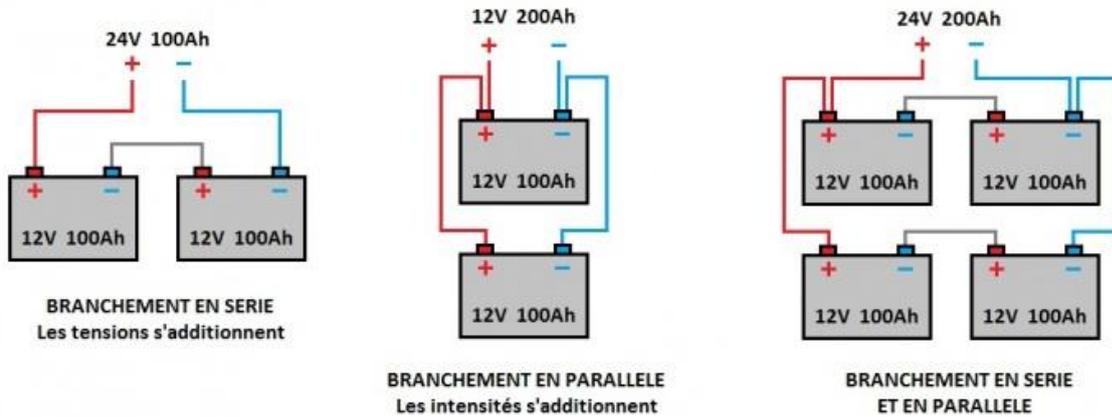
- **La densité énergétique** de la batterie est la quantité d'énergie stockée par unité de masse ou de volume. Elle s'exprime en Wh/kg ou en Wh/L.

Comparaison des différentes technologies utilisées dans les batteries.

| Type de batterie | Densité (Wh/kg) | Plage de puissance | Rendement | Avantages / inconvénients |
|---|-----------------|--------------------|-----------|---|
|  Plomb | 50 | 100W à 10MW | 70 à 85% | Utilisation: véhicules routiers, véhicules électriques, site isolé non raccordé au réseau. Pas d'effet mémoire, grand nombre de cycles de charge/décharge mais lourd et polluant. |
|  NiCd Nickel-Cadmium | 50 | Quelques Watts | 70 à 80% | Accepte les surcharges, possibilité d'une charge rapide, faible autodécharge Problème d'effet mémoire, pollution |
|  NiMH Nickel Métal Hydrure | 75 | Quelques Watts | 70 à 80% | Pas d'effet mémoire Charge délicate Courant de décharge limité |
|  Li-ion Lithium-ion | 300 | 100W à 10MW | 85 à 90% | Utilisation: téléphones portables, véhicules électriques, appareils photo, ordinateurs portables, Coût élevé, chargeur spécifique (risque d'explosion) |
|  Na-S Sodium-Soufre | 100 à 120 | 50kW à 10MW | 85 à 90% | Stockage d'énergie intégré à un système de production d'électricité Peu couteux mais faible durée de charge. |

Capacité d'une association de batteries

La capacité représente la quantité de charges électriques stockées dans la batterie, mais pas la quantité d'énergie. Pour connaître cette quantité d'énergie (qui s'exprime en Watt-heure (Wh)), il faut multiplier la capacité par la tension de la batterie : $Ah \times V = Wh$. Il est important de ne pas confondre quantité de courant et quantité d'énergie. Par exemple, si on branche deux batteries 12V 100Ah en série on obtient l'équivalent d'une batterie de ... 100Ah, alors que la quantité d'énergie a doublé.



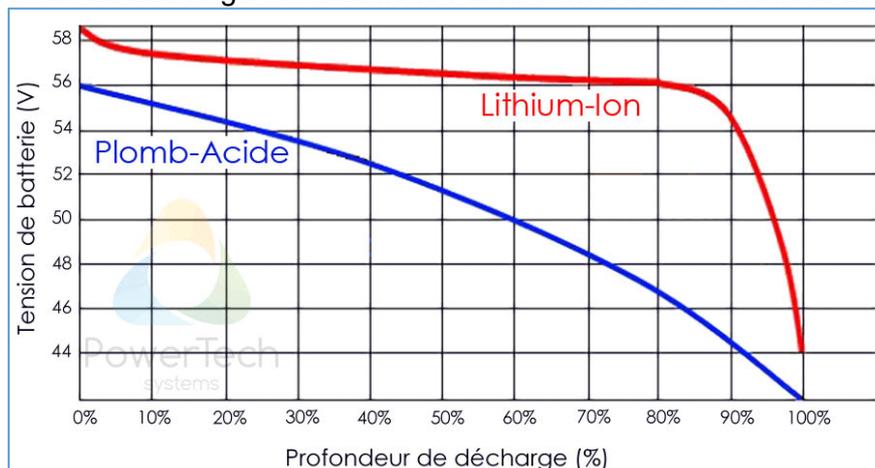
Synthèse

| | |
|--|---|
| La capacité Q (ou quantité d'électricité) est le produit de l'intensité I du courant (en ampère) par le temps t . Si t est en secondes, Q est en Coulombs (C) Si t est en heures, Q est en ampère-heure (Ah) 1 Ah = 3600 C | $Q = I \times t$ |
| La puissance consommée P (en W) est égale au produit de la tension U (en V) de la batterie par le courant I (en A) qu'elle délivre | $P = U \times I$ |
| L'énergie E est égale au produit de la puissance P (en W) absorbée par le temps de fonctionnement t . Si t est en secondes, E est en Joules (J) Si t est en heures, E est en Watt-heure (Wh) E est égale au produit de la tension U (en V) et de la capacité Q | $E = P \cdot t$ $E = U \times Q$ |

Décharge des batteries

Lorsqu'une batterie se décharge, la tension à ses bornes diminue. En fonction du type de batterie, la courbe est plus ou moins aplatie.

Exemple: courbes de décharge d'une batterie Plomb-Acide et d'une batterie Lithium-Ion



Mesure de l'état de charge (SoC: State of Charge) d'une batterie

Il est essentiel de pouvoir suivre l'état de charge d'une batterie pour éviter, en la déchargeant trop profondément, de l'altérer de façon irréversible.

La profondeur de décharge (DoD: Depth of Discharge) est la quantité d'énergie qui a été déchargée de la batterie. Elle est donnée en pourcentage de sa capacité. Il ne faut pas décharger la batterie au-delà d'un certain seuil (qui dépend du type de batterie) pour éviter la survenue de certains phénomènes chimiques qui altèrent de façon irréversible la batterie.

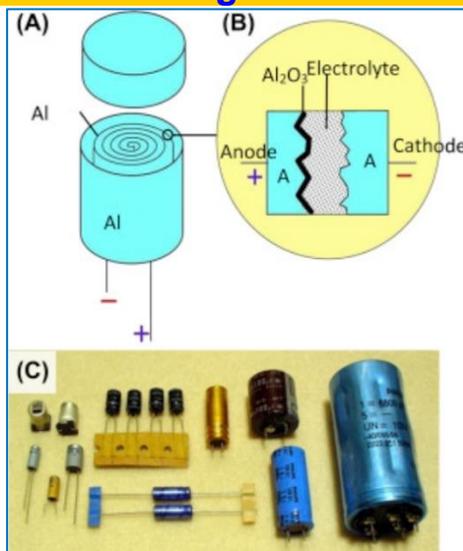
La **tension de coupure** caractérise la valeur en deçà de laquelle le système est programmé pour couper l'alimentation du système et ainsi éviter que la batterie ne passe en décharge profonde.

La **tension nominale** est la tension de référence d'une batterie ou d'une cellule. C'est elle qui est notée sur la batterie.

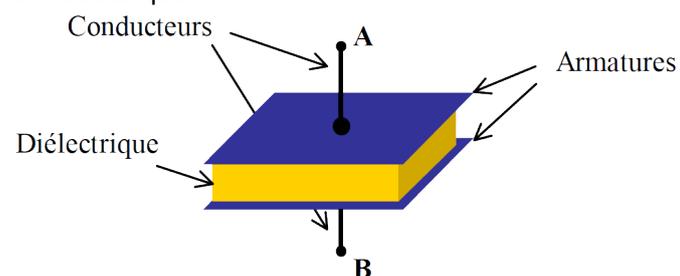
Pour mesurer l'état de charge de la batterie, on peut :

- Lire la tension à ses bornes pendant le fonctionnement,
- Utiliser un compteur de Coulomb qui mesure la quantité de charges injectées ou soustraites à la batterie.

3. Le stockage électrostatique d'énergie électrique



L'utilisation de condensateurs ou de supercondensateurs permettent de stocker l'énergie électrique sous forme électrostatique.



La capacité électrique d'un condensateur ou d'un supercondensateur est déterminée essentiellement par la géométrie des armatures et la nature du, ou des, isolant(s). La formule simplifiée suivante est souvent utilisée :

$$C = (\epsilon \cdot S) / e$$

avec : C : capacité en farads (F)
 S : surface des armatures (m²)
 ϵ : permittivité du diélectrique (F/m)
 e : distance entre les armatures (m)

| | Batterie | Supercondensateur |
|-----------------------------|-----------------|--------------------------|
| Densité de puissance (W/kg) | 150 – 1000 | 1000 – 5000 |
| Densité d'énergie (Wh/kg) | 50 - 1500 | 4 - 6 |

Le tableau ci-dessus permet de remarquer la supériorité des supercondensateurs en ce qui concerne la densité de puissance. Le point faible des supercondensateurs est leur densité d'énergie très mauvaise, ce qui signifie qu'ils ne peuvent stocker cette puissance que peu de temps (quelques secondes maximum). De ce fait, leur utilisation est limitée à des applications particulières, telles que le démarrage de locomotives, le contrôle de l'orientation des pales d'une éolienne ou l'amélioration de la qualité des courants transportés sur les réseaux électriques.

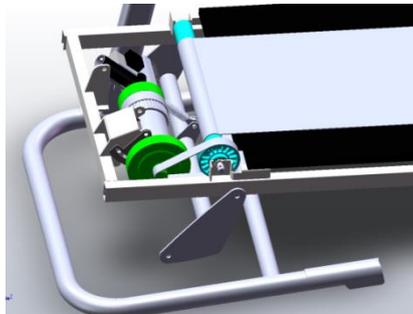
4. Le stockage cinétique de l'énergie

Les **volants d'inertie** stockent l'énergie sous forme cinétique. Ils sont constitués d'une masse en rotation autour d'un axe.

Les volants d'inertie sont des dispositifs qui se chargent et se déchargent sur quelques secondes à une minute. Ils sont donc réservés à des applications où les cycles de stockage sont de courte durée.

Tapis de course :

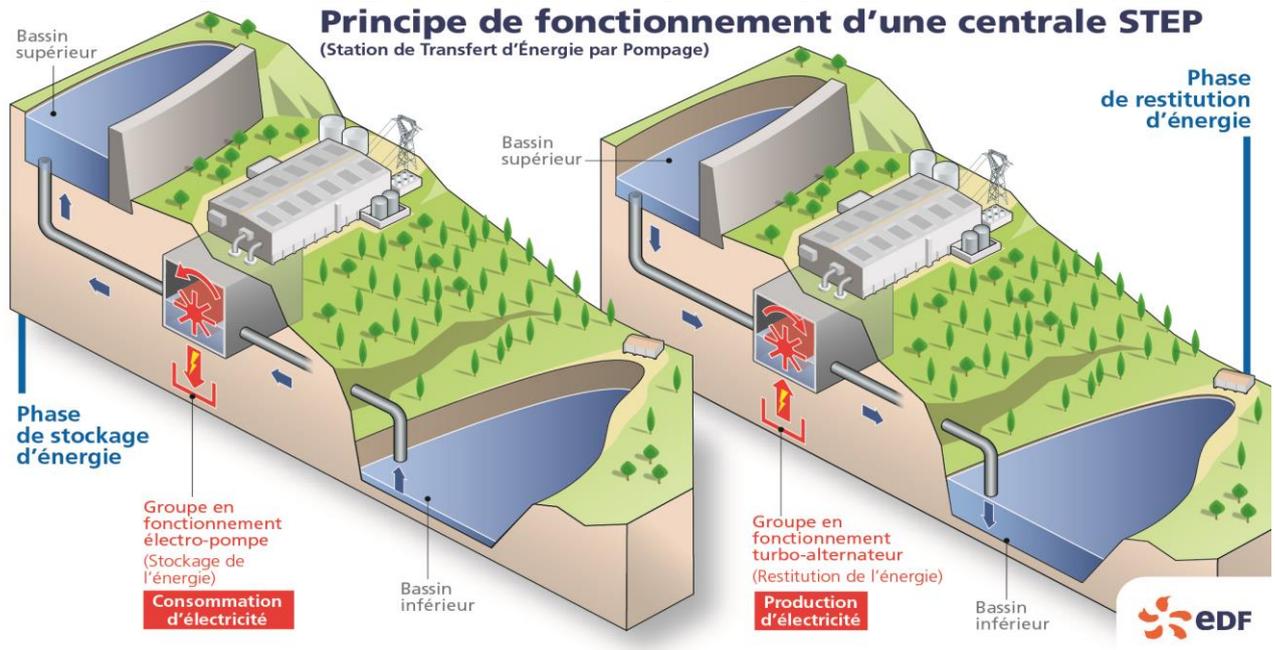
D'après vous qu'est ce qui justifie l'utilisation d'un volant d'inertie sur le tapis de course ?



5. Le stockage d'énergie sous forme hydraulique

Principe de fonctionnement d'une centrale STEP

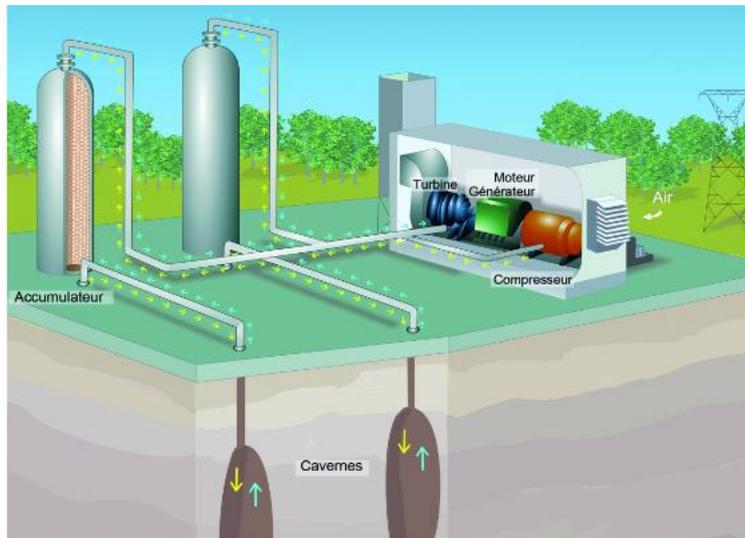
(Station de Transfert d'Énergie par Pompage)



6. Le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé

CAES (Compress Air Energy Storage)

L'air comprimé peut être utilisé pour produire un travail mécanique. Quand il y a une forte demande d'électricité, on utilise l'air qui a été précédemment comprimé et stocké pour mettre en mouvement une turbine qui grâce à un alternateur produit de l'électricité. Un des avantages de la solution est de ne générer que peu de risques (pas ou peu de produits toxiques, métaux rares, etc.) et de n'avoir aucune contrainte géographique (solution décentralisée) ni d'échelle dès lors qu'une source d'électricité est disponible.



7. Le stockage d'énergie sous forme de chaleur

Lorsque l'énergie électrique est produite par des sources intermittentes (éoliennes, panneaux solaires), l'énergie peut être stockée sous forme de chaleur pour être distribuée sur le réseau au moment des pics de demande.



8. Le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène

L'électricité va permettre de produire, via un électrolyseur, du dihydrogène (H_2). Le gaz est ensuite stocké soit sous forme liquide, solide ou gazeuse avant d'être à nouveau transformé en électricité dans une pile à combustible.

