

# Chapitre 10

## Stockage d'énergie

### 1. Pourquoi stocker l'énergie ?

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. C'est l'obstacle rencontré par tous les véhicules et parmi eux les véhicules électriques. C'est également la difficulté pour tous les appareils électriques portatifs autonomes (téléphones, etc.).

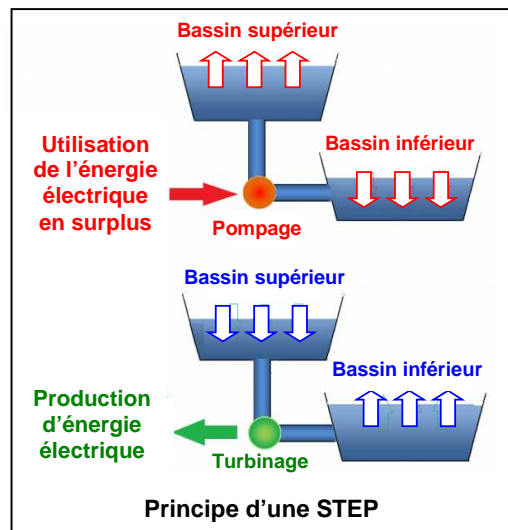
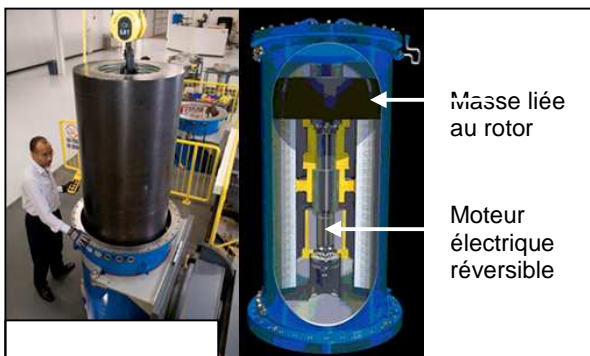


- Le besoin de compenser le décalage temporel entre la **demande en énergie** et la possibilité de **production**. C'est le problème lorsqu'on utilise des énergies renouvelables qui ne produisent jamais en quantité suffisante au moment où on en a besoin.

Les solutions de **stockage d'énergie** se divisent en quatre catégories principales :

- l'énergie mécanique potentielle ou cinétique**

Barrage hydroélectrique, Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP), stockage d'énergie par air comprimé (CAES), volants d'inertie ;



Le stockage d'énergie par volant d'inertie est utile pour la **régulation** et l'**optimisation énergétique** d'un système. Il ne permet pas d'obtenir une durée d'autonomie importante comme les batteries électrochimiques ou le stockage d'énergie par pompage / turbinage.

- l'énergie thermique** (chaleur latente ou sensible) dans le domaine du chauffage, de la climatisation et de la production d'ECS (Eau Chaude Sanitaire).
- l'énergie chimique** (filière hydrogène) dans les chaudières et les piles à combustible (PAC).
- l'énergie électrochimique ou électrostatique** (accumulateurs, batteries, condensateurs).

**Nous développerons uniquement cette dernière solution dans ce chapitre.**

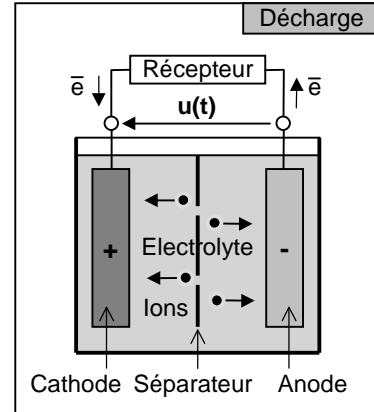
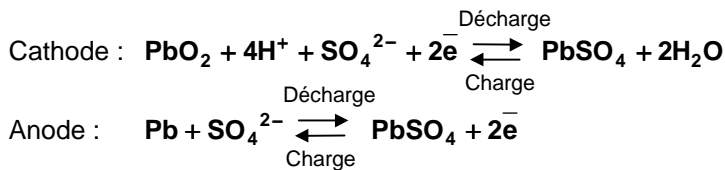
## 2. Générateurs électrochimiques

### 2.1. Principe

Les termes **piles**, **accumulateurs**, **batteries**, désignent des dispositifs dont la fonction est de transformer directement, c'est-à-dire sans passage par une forme intermédiaire, l'énergie libérée par une réaction chimique en **énergie électrique**. Ces **générateurs électrochimiques** sont constitués d'un conducteur ionique, appelé **électrolyte** sous forme liquide ou gel, dans lequel baignent deux électrodes : l'**anode** et la **cathode**.

Lors de la décharge, les électrons  $\bar{e}$  quittent l'anode vers le circuit extérieur et retournent au générateur par la cathode. L'anode subit une **oxydation** (perte d' $\bar{e}$ ) alors que la cathode subit une **réduction** (gain d' $\bar{e}$ ). On parle d'**oxydoréduction**.

□ Exemple : batterie plomb - acide sulfurique



On empêche le court circuit entre électrodes avec **un séparateur** qui ne conduit pas les électrons (isolant) mais qui permet le passage des ions par des trous dans sa structure. Pour les générateurs à électrolyte liquide, il s'agit d'un **matériau poreux** (papier, plastique finement perforé, etc.).

### 2.2. Différents types

Piles et accumulateurs		
		
<b>Accumulateurs Ni-Cd</b> 1,2 V – 250 à 1700 mAh	<b>Piles alcalines</b> 1,5 à 9 V – 550 à 2200 mAh	<b>Piles boutons Lithium</b> 1,5 V – 50 à 125 mAh
Les <b>accumulateurs</b> produisent du courant continu avec une différence de potentiel ou tension relativement faible ( <b>1 à 3 V</b> en général). Pour obtenir une tension plus élevée, il faut les associer (on parle de batteries). Ils sont <b>rechargeables par opposition aux piles</b> qui ne le sont pas.		
Batteries		
		
<b>Batterie Plomb-Acide</b> 12 V – 5,8 Ah – 150 A (crête)	<b>Batterie Ni-Cd</b> 4,8 V – 650 mAh	<b>Batterie Li-Po</b> 3,7 V – 550 à 2000 mAh
Une <b>batterie</b> désigne un ensemble d'accumulateurs électriques raccordés en : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>série</b> pour augmenter la tension ;</li> <li>▪ <b>parallèle</b> pour avoir une plus grande capacité ou plus de courant qu'avec un élément seul.</li> </ul>		

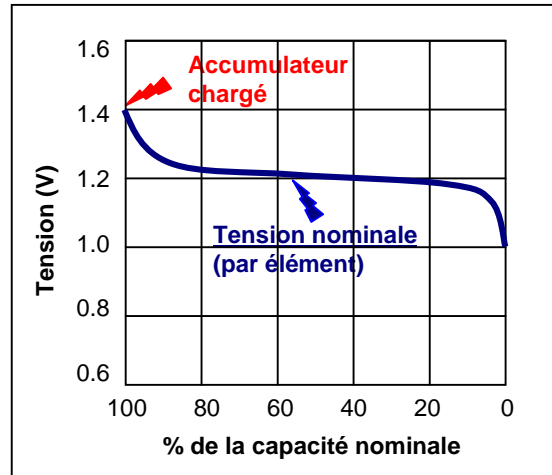
### 2.3. Grandeurs caractéristiques

#### 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 courbe ci-contre, donnée à titre indicatif, est valable pour les accumulateurs **Ni-Cd** et **Ni-MH**. La tension nominale par élément est de **1,2 V**.

**La tension de la batterie est un multiple de la tension de l'élément de base.**



#### 2.3.2. Capacité nominale et capacité réelle

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** :

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

On définit la **capacité nominale C<sub>x</sub>** qui correspond à une décharge complète à **courant constant** à **25°C** pendant **X heures**. Le courant de décharge **I** est alors égal à **C/X** (X = 10 ou 20 pour une batterie plomb - acide). On note ainsi **1C**, **2C**, **C/2**, **C/10** ... le régime de courant de décharge.

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

□ **Exemple** : Capacité réelle d'un accumulateur Ni-MH

**Energizer Rechargeable  
AA-2500 (HR6)**



Système chimique : **Nickel-Metal Hydride**  
 Désignation : **IEC-HR6**  
 Tension nominale : **1.2 Volts**  
 Capacité nominale : **2500 mAh**

Un accumulateur **C<sub>10</sub> = 2,5 Ah** tolère un courant de décharge de **250 mA (0.1C)** pendant **10 h**. Sa capacité réelle est :

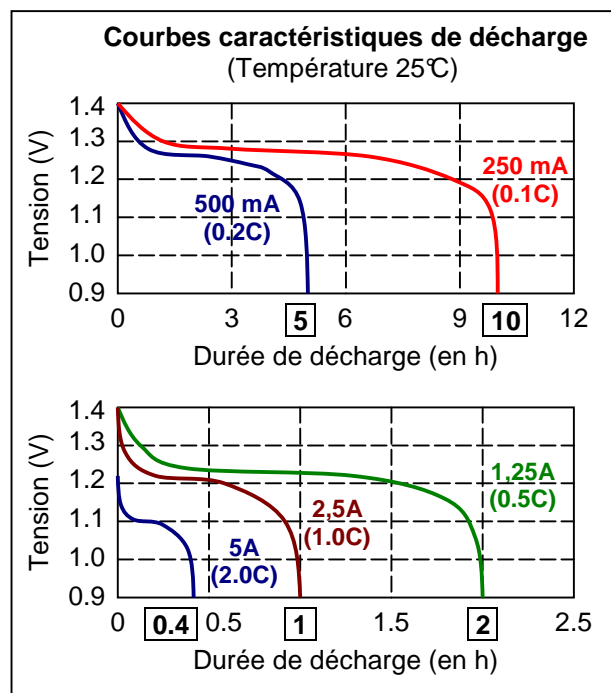
$$C = 10 \times 0,25 = 2,5 \text{ Ah} = C_{10}$$

Si **I = 2,5 A (1.0C)**, son temps de décharge est de **1 h**. Sa capacité réelle est toujours :

$$C = 1 \times 2,5 = 2,5 \text{ Ah} = C_{10}$$

Si **I = 5 A (2.0C)**, son temps de décharge est d'environ 0,4 h .

Sa capacité réelle n'est plus que de **C = 0,4 x 5 = 2,0 Ah < C<sub>10</sub>**



La loi de **PEUKERT** modélise la capacité d'une batterie en fonction du courant débité.

$$C_P = I^k \cdot \Delta t$$

avec :  $C_P$  capacité de **PEUKERT** (en Ah) pour un courant de décharge  $I = 1 \text{ A}$   
 $I$  courant de décharge (en A)  
 $k$  constante de **PEUKERT** (supérieure à 1)  
 $\Delta t$  durée de décharge (en h)

□ **Exemple** : Capacité réelle d'une batterie  $C_{20} = 100 \text{ Ah}$  pour une décharge en 10 h  
 On prendra  $k = 1,1$

$$\text{On calcule : } C_P = I_{20}^{1,1} \cdot 20 = \left(\frac{C_{20}}{20}\right)^{1,1} \cdot 20 = 5^{1,1} \cdot 20 \approx 117 \text{ Ah}$$

$$\text{On en déduit : } C_P = \left(\frac{C}{10}\right)^{1,1} \cdot 10 \Rightarrow C = 10 \cdot \left(\frac{C_P}{10}\right)^{\frac{1}{1,1}} \approx \boxed{94 \text{ Ah}}$$

### 2.3.3. Densité énergétique

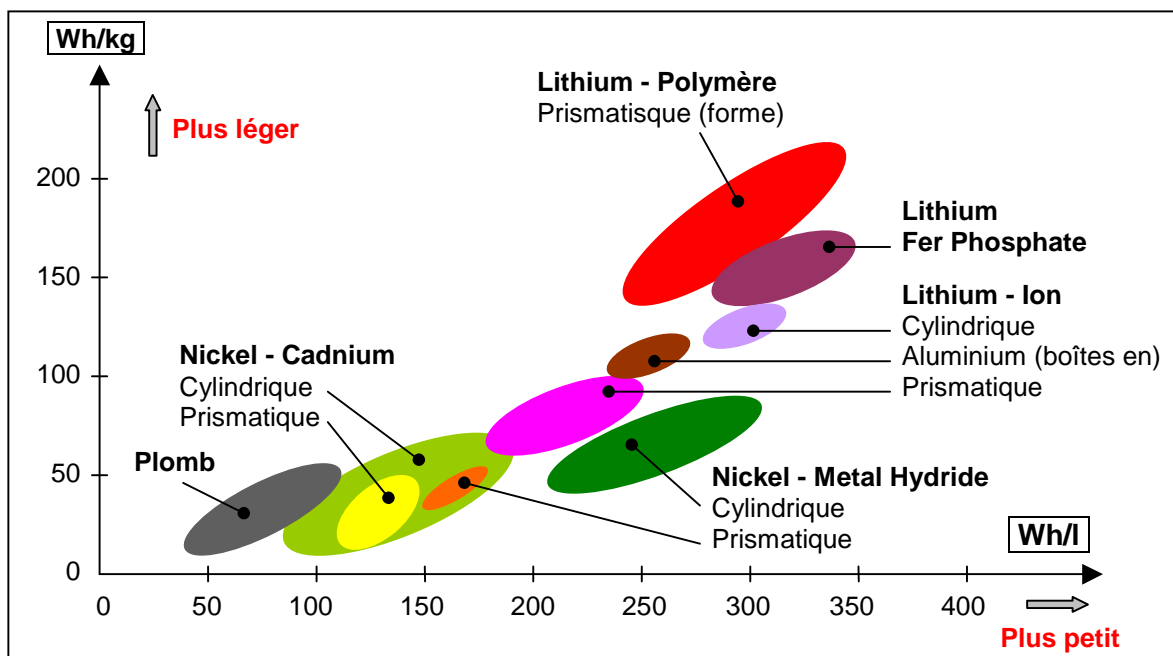
L'énergie stockée s'écrit :

$$W_{\text{bat}} = C \cdot U = UI \cdot \Delta t$$

(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).

#### □ Densité énergétique de différentes technologies de batteries



□ **Exemple** : Calcul de l'énergie massique d'un accumulateur Ni-MH  
 Tension 1,2 V - capacité 1500 mAh - masse 25 grammes

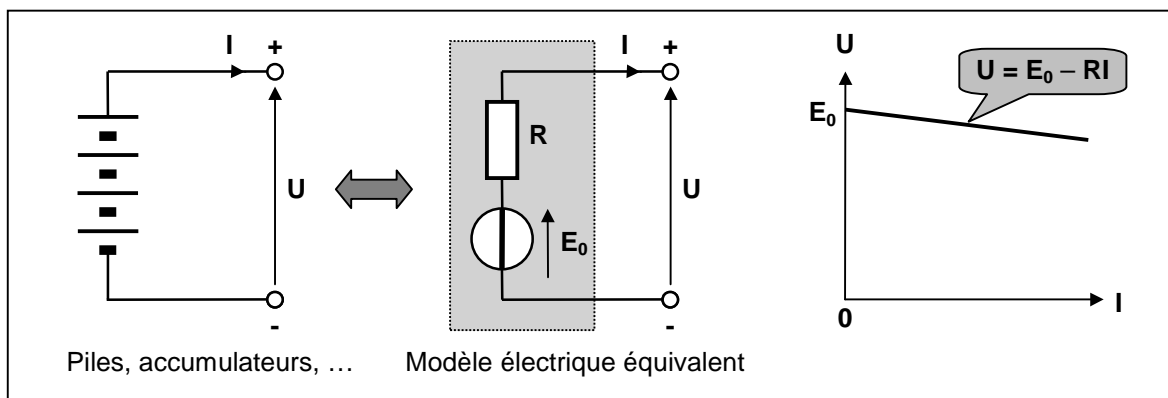
$$\text{L'énergie totale fournie est : } W = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8 \text{ Wh}$$

$$\text{Soit une énergie massique : } \frac{1,8}{0,025} = \boxed{72 \text{ Wh/kg}}$$



### 2.3.4. Résistance interne

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



$E_0$  est la fém. à vide (force électromotrice) du générateur.  $R$  est sa résistance interne en  $\Omega$ .

La valeur de la résistance interne  $R$  est une donnée connue du constructeur. Elle correspond à la somme de la résistance électrique des matières solides (électrodes, connexions) et de la résistance électrolytique. Elle a pour effet de faire chuter la tension  $U$  quand le courant  $I$  augmente.

**Les fabricants de batteries cherchent à obtenir une résistance interne la plus faible possible. Typiquement, elle est comprise entre 5 mΩ et 50 mΩ contre 1 Ω pour les piles.**

### 2.3.5. Autodécharge

En raison d'impuretés présentes dans les produits chimiques utilisés pour leur fabrication, des technologies mises en œuvre et des réactions électrochimiques qui y ont lieu, les batteries se déchargent même quand elles ne sont pas utilisées.

**Cette autodécharge est souvent exprimée en % de perte relative de capacité par mois.**

### 2.3.6. Cyclabilité (durée de vie)

Elle caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est à dire le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge.

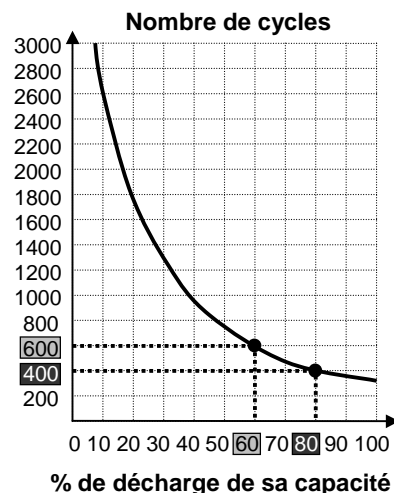
- ❑ **Exemple** : Batterie type « batterie de traction » à électrolyte gélifié « DRYFIT »  
Utilisation : chariot de golf électrique, chariot électrique pour handicapé, ...

C'est une batterie au plomb de très haute qualité, totalement étanche et sans entretien. Elle présente un haut niveau de sécurité, il n'y a pas d'oxydation et pas de risque de fuite d'acide. Elle fournit des courants intenses de façon soutenue.



Sa **cyclabilité** est importante : elle peut supporter de nombreux cycles de décharge et de recharge.

- Si on décharge cette batterie à **60%** de sa capacité nominale, sa cyclabilité sera de **600 cycles**.
- Si on décharge cette batterie à **80%** de sa capacité nominale, sa cyclabilité sera de **400 cycles**.



### 2.3.7. Effet mémoire

L'effet mémoire est un phénomène qui affecte les performances des accumulateurs. Le fait de ne pas respecter le cycle complet de décharge (avant d'être rechargée) entraîne une diminution de la quantité d'énergie que l'accumulateur peut restituer, donc une perte de capacité.


**L'effet mémoire concerne principalement les technologies Ni-Cd et Ni-MH.  
Les batteries plomb et lithium sont moins sensibles à l'effet mémoire.**

### 2.4. Tableau comparatif de différentes technologies de batteries


Type	Densité massique en Wh/kg	Densité volumique en Wh/l	Tension d'un élément	Puissance en pointe 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	> 1000	> 20%
Na-NiCl <sub>2</sub> (ZEBRA)	120	180	2,6 V	200	800	12%/jour
Li-Ion	150-190	220 - 330	3,6 V	1500	500-1000	10%
Li-Po	100-130	250 - 300	3,7 V	250	200-300	10%

### 2.5. Impact environnemental

La **fabrication** ou le **recyclage** de batteries a un coût environnemental important.

- La majeure partie du **plomb** des batteries provient du recyclage. Le problème posé par les batteries au plomb se situe essentiellement dans la récupération des plastiques contaminés par le plomb et l'acide sulfurique.
- 

**Batterie Plomb - acide**



**Batterie Li-ion**
- Le **cadmium**, métal lourd et très polluant est utilisé dans les batteries d'appareils électriques portatifs, employés notamment dans le bricolage. Dans la mesure où le taux de recyclage est très important pour ces batteries, ce n'est pas un danger pour l'environnement. Néanmoins, le cadmium est désormais interdit pour les batteries grand public.
  - L'extraction du **nickel** est en forte augmentation à travers le monde. Cette extraction est bien contrôlée et ne présente que peu d'impact sur l'environnement pour les pays développés.
  - Pour les batteries **Li-Ion** et **Li-Po**, le **lithium** représente moins de 1% du poids de la batterie. Les métaux les plus importants sont le cobalt, l'acier, l'aluminium et le cuivre. L'emploi du **cuivre** ou de l'**aluminium** est en pleine expansion et très coûteux en énergie. Le **lithium** est peu recyclé, il est stocké sous forme de cailloux dans les décharges et sous cette forme n'est pas polluant. Le tableau suivant compare les **technologies de batteries les plus utilisées**.

Types de batteries		Plomb - acide ou gel	Lithium Ion	Lithium Polymère	Lithium Fer Phosphate
Dangerosité	Classement	-	---	--	+
	Risques	Explosion et acide	Explosion et incendie	Incendie	Dégagement de chaleur
Environnement	Classement	---	+	++	+++
	Polluant	Plomb - Mercure	faible cobalt et nickel	faible cobalt et nickel	Aucun

## 2.6. Exercice : Dimensionnement d'une batterie d'accumulateurs

On désire caractériser une batterie afin d'alimenter pendant **1 h 30 au moins**, un système électrique quelconque fonctionnant sous une tension de **12 V** et absorbant une puissance de **30 W**.

### ➤ Déterminer :

- La capacité minimale **C** de la batterie.
- Le câblage de la batterie avec des accumulateurs de type **R20** et le coût.
- Le câblage de la batterie avec des accumulateurs de type **R14** et le coût.

	Tension	Capacité	Conditionnement	Dim. (mm)	Figure	Prix TTC
R3 (AAA)	1,2 Vcc	300 mAh	blister de 2	10,5 x 44	1	4,90 €
R6 (AA)	1,2 Vcc	800 mAh	blister de 4	14,5 x 50	2	7,00 €
R6 (AA)	1,2 Vcc	750 mAh	blister de 4	22,4 x 41	3	11,00 €
R14 (C)	1,2 Vcc	2,5 Ah	blister de 2	26,0 x 50	4	10,90 €
R20 (D)	1,2 Vcc	4,5 Ah	blister de 2	34,0 x 61	5	15,80 €

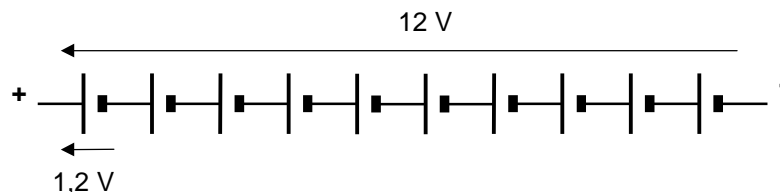
### Réponses :

La capacité minimale de la batterie est  $C = I \cdot \Delta t = \frac{P}{U} \cdot \Delta t = \frac{30}{12} \cdot 1,5 = \boxed{3,75 \text{ Ah}}$

Pour obtenir la tension de 12 V, il faut associer 10 accumulateurs en série de même capacité.

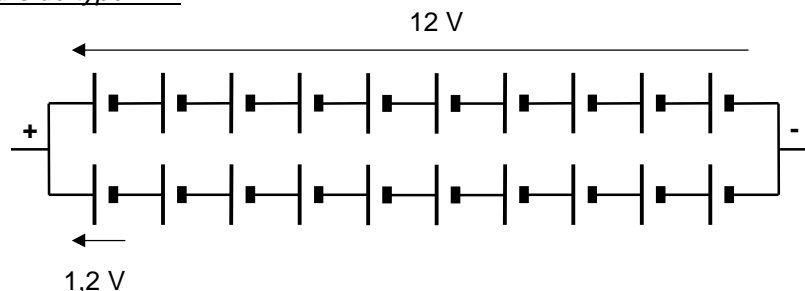
#### ▪ Accumulateurs de type R20

Une seule branche de 10 accumulateurs en série suffit car  $\boxed{4,5 \text{ Ah} > 3,75 \text{ Ah}}$ .



Coût : 5 blisters de 2  $\Rightarrow 5 \times 15,80 \text{ €} = \boxed{79 \text{ €}}$

#### ▪ Accumulateurs de type R14



Le montage en parallèle de deux branches identiques (donc 20 accumulateurs au total) permet d'obtenir une capacité d'ensemble de  $2 \times 2,5 \text{ Ah} = \boxed{5 \text{ Ah} > 3,75 \text{ Ah}}$ .

Coût : 10 blisters de 2  $\Rightarrow 10 \times 10,90 \text{ €} = \boxed{109 \text{ €}}$

### 3. Supercondensateurs : Stockage sous forme électrostatique

#### 3.1. Généralités

Les batteries ont une **forte densité énergétique** mais une **faible densité de puissance**. Leur durée de vie en nombre de cycles charge - décharge est relativement limitée. Le développement technologique et la maîtrise de fabrication de nouveaux matériaux ont permis la réalisation d'autres systèmes modernes de stockage d'énergie électrique comme les **supercondensateurs**. Ils peuvent être utilisés de façon complémentaire aux batteries ou à la pile à combustible.



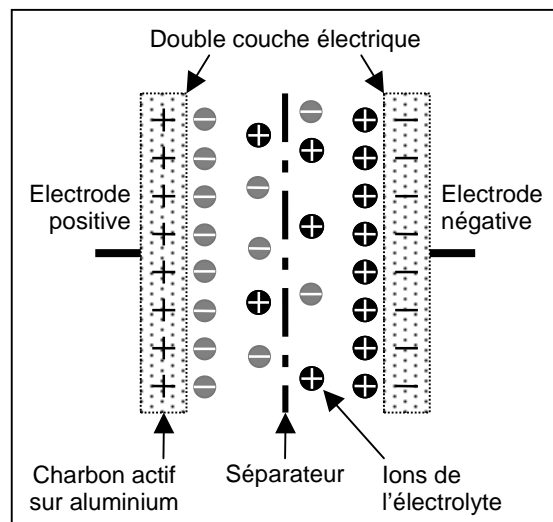
#### 3.2. Principe

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 conduction ionique (séparateur).

Le principe de fonctionnement est basé sur le **stockage de l'énergie** par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes.

Lorsqu'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux interfaces **électrode - électrolyte**.

Une **double couche électrique** se développe ainsi sur chaque interface, de sorte que l'on peut voir schématiquement un supercondensateur comme l'association de deux condensateurs en série, l'un à l'électrode positive et l'autre à l'électrode négative. Le stockage de l'énergie est donc **électrostatique** et non électrochimique comme dans le cas des batteries.



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

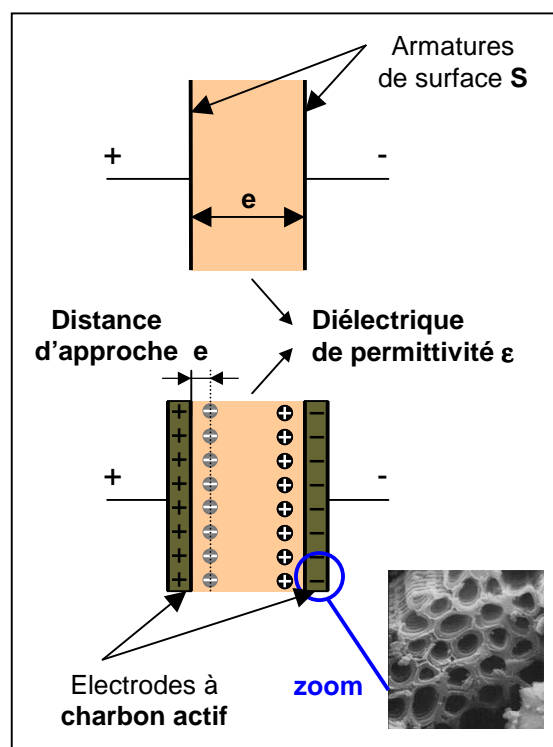
La valeur de sa capacité **C** (en Farad) est donnée par la relation simplifiée :

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

- 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 (inférieure au nanomètre). On peut ainsi obtenir des valeurs **très élevées de capacités** (1 à 5000 F).





### 3.3. Comparaison des différents systèmes de stockage

	Condensateurs électrolytiques	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 (cycles)	> 500 000	> 500 000	1000
Durée de la charge nominale	$10^{-6}$ à $10^{-3}$ s	1 à 30 s	1 à 5 h
Durée de la décharge nominale	$10^{-6}$ 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.
- Le problème des batteries classiques réside dans leur faible densité de puissance. Dans ce domaine, les condensateurs restent indétrônables avec une densité de puissance pouvant atteindre 100 kW/kg ce qui représente dix fois la densité de puissance d'un supercondensateur.
- Les condensateurs et supercondensateurs ont une durée de vie importante ( $> 5.10^5$  cycles).

### 3.4. Conclusion

De par leur **forte densité de puissance**, les supercondensateurs sont des éléments de stockage particulièrement intéressants pour des systèmes embarqués caractérisés par des transferts d'énergie à haut rendement et de courte durée, typiquement de l'ordre de la seconde.

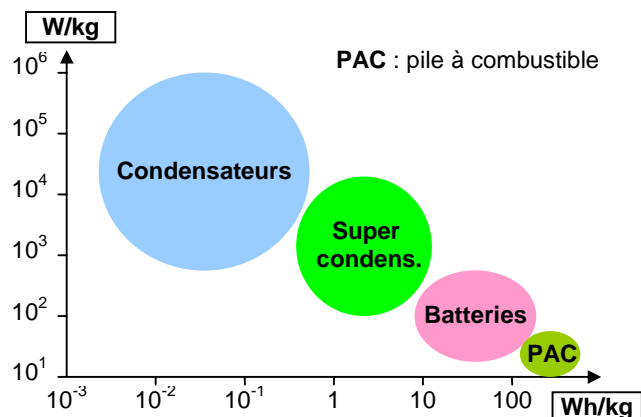
Les performances dynamiques élevées de ces composants s'appuient sur la très faible résistance interne ainsi que sur la nature majoritairement électrostatique du stockage de l'énergie.

Mais, leur **faible densité d'énergie** implique, la plupart du temps, une association avec une source d'énergie principale (batteries par exemple) pour répondre à l'ensemble du besoin en énergie électrique propre à l'application.

#### □ Perspectives

Le prix des **supercondensateurs** a déjà été divisé par **100 en 15 ans** et on commence donc à voir apparaître les premiers bus électriques, trains, tramways ou encore bateaux alimentés exclusivement par des supercondensateurs. Lorsque les **supercondensateurs haute densité** arriveront sur le marché, il sera possible de recharger son téléphone portable en quelques secondes, et surtout de recharger sa voiture électrique en moins de cinq minutes, de quoi développer radicalement le marché du véhicule électrique !

**Source** : <http://www.supercondensateur.com>



Bus électrique chinois à supercondensateur

### 3.5. Exercice : Dimensionnement d'un pack de supercondensateurs

Le tramway de Bordeaux est un système de transport en commun qui dessert l'agglomération bordelaise en site propre et qui comporte trois lignes d'une longueur totale de 44 km. Ces véhicules sont alimentés en énergie électrique par le sol.

Lorsque plusieurs tramways, en bout de ligne, démarrent simultanément, cela provoque un effondrement de la tension délivrée qui peut passer de **750 V** à **170 V**.



Pour éviter ce phénomène, certains constructeurs utilisent des supercondensateurs qui peuvent fournir en partie la pointe de puissance au démarrage de la rame.

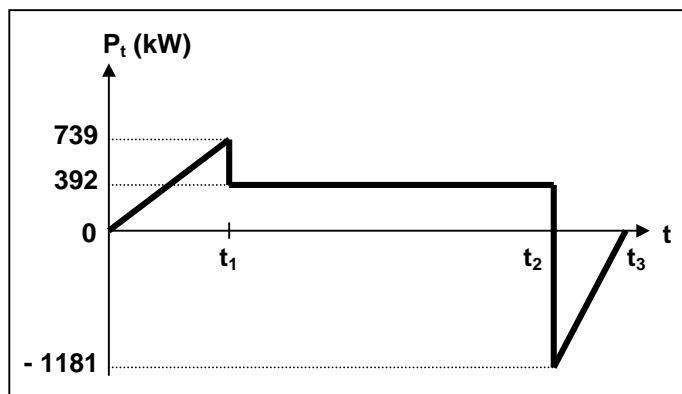
**Ces supercondensateurs se rechargent pendant les phases de freinage par récupération d'énergie. L'économie annoncée est de 93 000 kWh par an.**

#### □ Etude énergétique de la motorisation

L'évolution temporelle de la puissance absorbée par le tramway entre deux stations est représentée ci-contre.

La durée de la phase d'accélération est  $t_1 = 25$  s, celle de la phase de décélération vaut  $t_3 - t_2 = 15$  s.

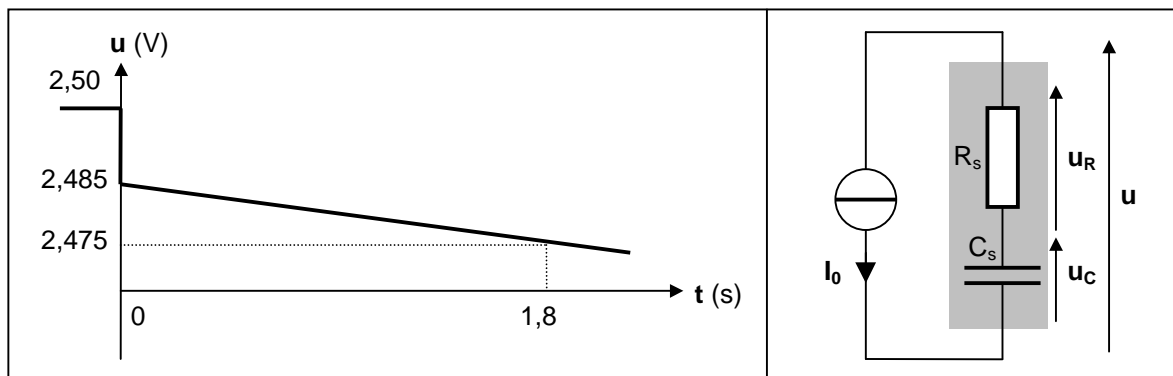
- Déterminer l'énergie nécessaire à la phase d'accélération ( $W_A$ ) et l'énergie récupérable à la phase de décélération ( $W_D$ ). **Conclure.**



#### □ Modélisation du supercondensateur

Un supercondensateur de masse  $M = 0,4$  kg et de tension  $u = 2,5$  V est modélisé par l'association d'un condensateur  $C_s$  en série avec une résistance  $R_s$ . On cherche à identifier de manière expérimentale les éléments  $R_s$  et  $C_s$ . Pour cela, à l'instant  $t = 0$ , on fait subir au supercondensateur une décharge à courant constant  $I_0 = 10$  A (échelon de courant) avec  $u(0^+) = 2,5$  V.

L'allure de l'évolution de la tension  $u(t)$  est représentée ci-dessous :



- Déterminer la relation entre  $u$ ,  $u_C$ ,  $R_s$  et  $I_0$  pour  $t > 0$ .

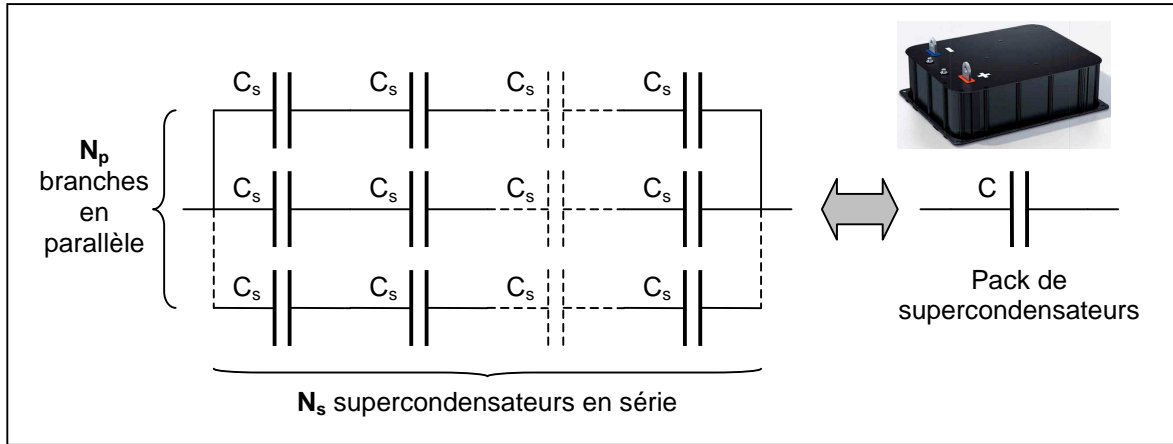
- Montrer que  $\frac{du}{dt} = -\frac{I_0}{C_s}$  pour  $t > 0$ .

- Déterminer les valeurs de  $C_s$  et  $R_s$ .

□ **Dimensionnement énergétique du pack de supercondensateurs**

On considère désormais  $R_s = 0$ .

Dans la pratique, on doit associer en série et en parallèle les supercondensateurs afin de réaliser le pack de supercondensateurs. On note  $N_s$  le nombre de supercondensateurs en série et  $N_p$  le nombre de branches en parallèle.



La tension nominale aux bornes du pack de supercondensateurs est  $U_n = 720 \text{ V}$ .

On considère que le pack de supercondensateurs de capacité  $C$  subvient à l'énergie nécessaire à la phase d'accélération. Celui-ci ne peut se décharger au delà de **50%** de sa tension nominale.

- **Rappeler** l'expression de l'énergie  $W$  stockée dans le pack en fonction de  $C$  et de la tension  $U$  à ses bornes. Compte tenu de la décharge autorisée, **déterminer** la valeur de  $C$ .
- **Déterminer** le nombre de supercondensateurs ainsi que la masse du pack.
- Quelle sera l'incidence de  $R_s$  ? Vous calculerez la résistance  $R$  totale du pack.

Réponses :

□ Etude énergétique de la motorisation

- L'énergie nécessaire à la phase d'accélération est :

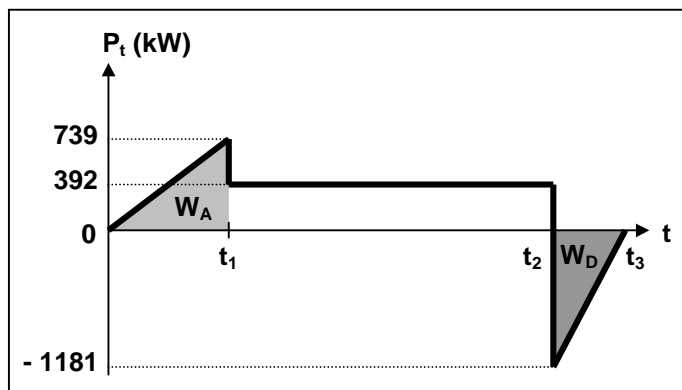
$$W_A = \int_0^{t_1} P_t \cdot dt = \frac{739 \cdot 10^3 \cdot 25}{2}$$

$$W_A = 9,24 \text{ MJ} = \boxed{2,57 \text{ kWh}}$$

Rappel : 1 kWh = 3,6 MJ

L'énergie récupérable ( $W < 0$ ) lors de la phase de décélération est :

$$W_D = \int_{t_2}^{t_3} P_t \cdot dt = -\frac{1181 \cdot 10^3 \cdot 15}{2} = -8,86 \text{ MJ} = \boxed{-2,46 \text{ kWh}}$$



Cette énergie pourrait en grande partie servir au démarrage et ainsi soulager l'alimentation.

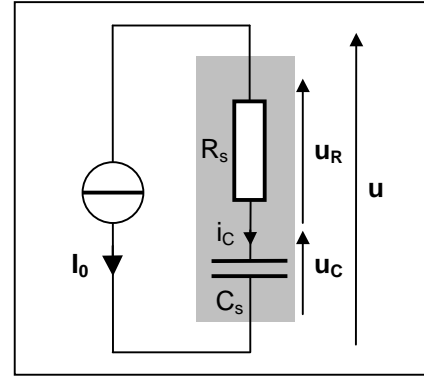
□ Modélisation du supercondensateur

➤ D'après la loi des mailles :  $u = u_R + u_C = -R_s I_0 + u_C$

➤ En dérivant, on en déduit :  $\frac{du}{dt} = \frac{du_C}{dt} = -\frac{I_0}{C_s}$

En effet, d'après la relation tension - courant pour  $C_s$  :

$$i_C = C_s \frac{du_C}{dt} \text{ avec } i_C = -I_0$$



➤ Détermination de la résistance :

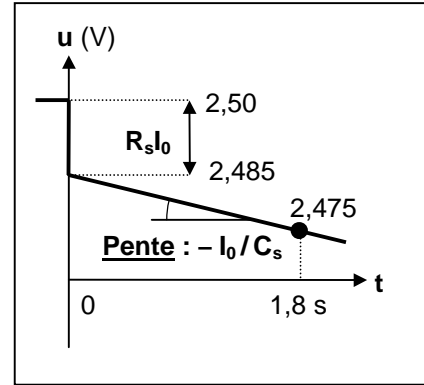
A l'instant  $t = 0$ ,  $u$  subit une discontinuité d'amplitude :

$$R_s I_0 = 2,5 - 2,485 = 0,015 \text{ V} \Rightarrow R_s = \frac{0,015}{10} = 1,5 \text{ m}\Omega$$

Détermination de la capacité :

La pente de la caractéristique  $u(t)$  vaut  $-I_0 / C_s$ .

$$-\frac{I_0}{C_s} = \frac{2,475 - 2,485}{1,8} = -\frac{0,01}{1,8} \Rightarrow C_s = \frac{18}{0,01} = 1800 \text{ F}$$

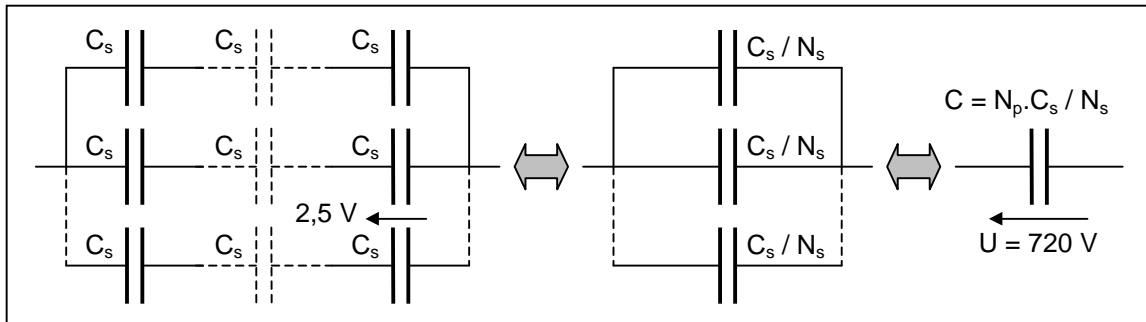


□ Dimensionnement énergétique du pack de supercondensateurs

➤ L'énergie électrostatique  $W$  stockée dans le pack s'exprime par la relation :  $W = \frac{1}{2} C U^2$

On désire :  $W = \frac{1}{2} C U_n^2 - \frac{1}{2} C (0,5 U_n)^2 = W_A \Rightarrow C = \frac{2 W_A}{0,75 U_n^2} = \frac{2 \cdot 9,24 \cdot 10^6}{0,75 \cdot (720)^2} = 47,5 \text{ F}$

➤ Pour avoir  $U = U_n = 720 \text{ V}$ , il faut associer  $N_s = U_n / 2,5 = 288$  supercondensateurs en série.



Une branche en série équivaut alors à un supercondensateur de capacité  $C_s / N_s = 6,25 \text{ F}$ .

Pour former un pack de supercondensateurs de  $47,5 \text{ F}$ , il convient de mettre  $N_p$  branches en série (de  $6,25 \text{ F}$  chacune) en parallèle avec  $N_p = C / 6,25 = 47,5 / 6,25 = 7,6$ .

En pratique, on mettra en parallèle  $N_p = 8$  branches de  $N_s = 288$  supercondensateurs connectés en série ce qui représente  $N_p \cdot N_s = 2304$  supercondensateurs pour constituer le pack.

La masse totale du pack sera de  $2304 \times 0,4 = 921,6 \text{ kg}$ .

➤ La résistance totale du pack est  $R = N_s \cdot R_s / N_p = 54 \text{ m}\Omega$ . Cette résistance aura pour conséquence de limiter l'intensité du courant de court-circuit (intensité de pointe du pack) et d'engendrer des pertes par effet Joule, donc une baisse du rendement de l'ensemble.