

# Les sources d'énergie électrique





# Introduction

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : sources d'énergie électrique*



## Types de sources

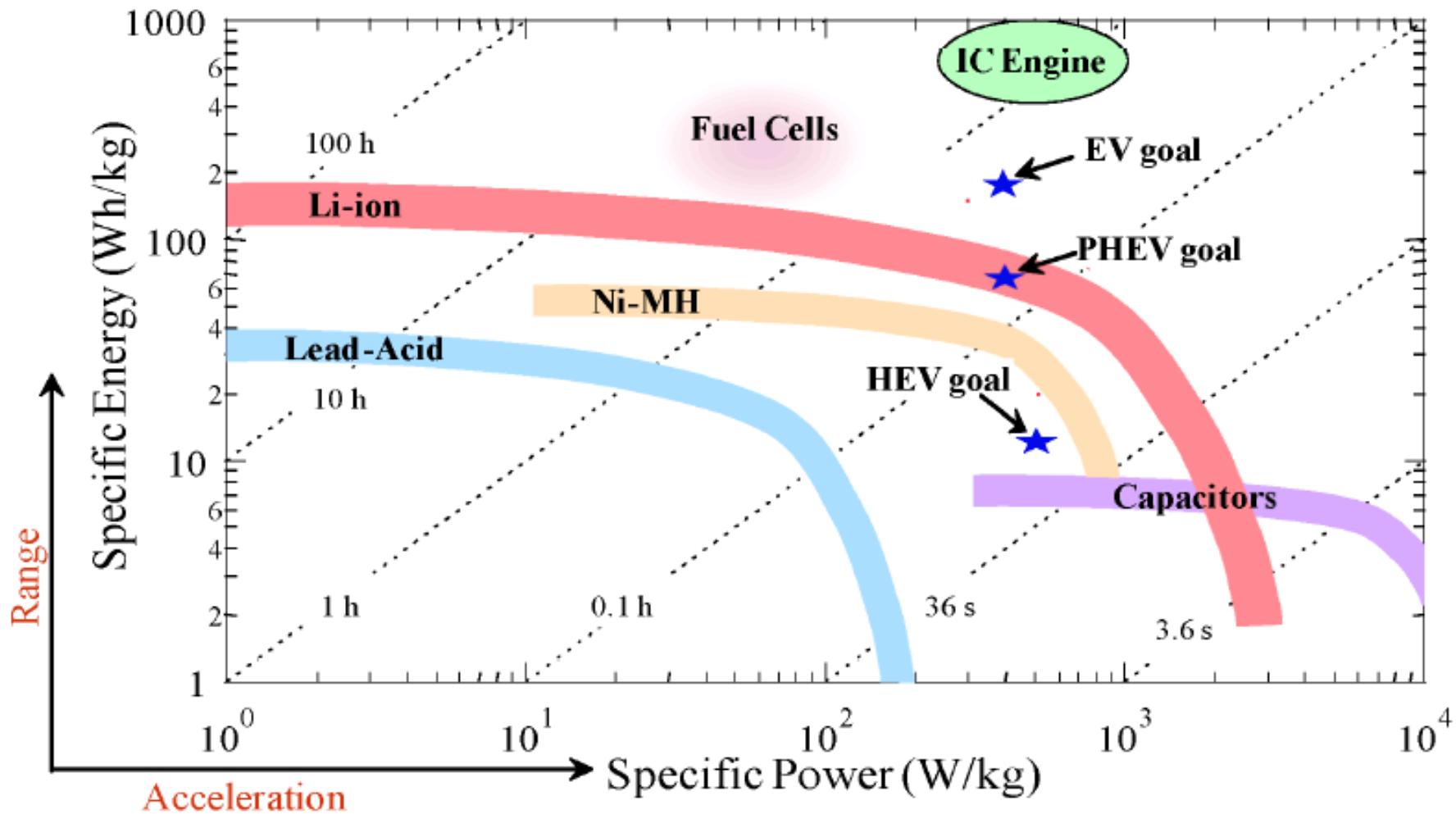
- Source  $\neq$  Stockage
- Réversibles ou irréversibles
- Tension et courant : **continus** ou alternatifs
- Typées énergie et/ou puissance
- Stationnaires ou embarquées

## Critères de dimensionnement

- Puissance disponible, énergie disponible (*pour les stockeurs*)
- Tension, courant de décharge : nominaux et maximaux
  - Si réversible : courant en charge (nominal et maximal)
- Encombrement, masse
- Sécurité
- Durée de vie
- Coût...



## Diagramme de Ragone





## Rappel : besoin de pilotage et de conversion de puissance

- Un CEP convertit une puissance électrique en adaptant la tension et le courant d'une source aux besoins de la machine électrique
  - A l'image d'une transmission qui convertit une puissance mécanique

Moteur \ Source	Continue	Alternative
Continu	DC/DC	AC/DC
Alternatif	DC/AC	AC/AC

- Abaisser ou augmenter la tension
- **Le CEP peut également assurer la RÉGULATION de la puissance fournie par la source, voire de la puissance réinjectée dans celle-ci.**

► Que se passe-t-il si l'on branche une batterie sur un moteur à courant continu ?



# Sources réversibles

Accumulateurs ou  
« cellules électrochimiques »

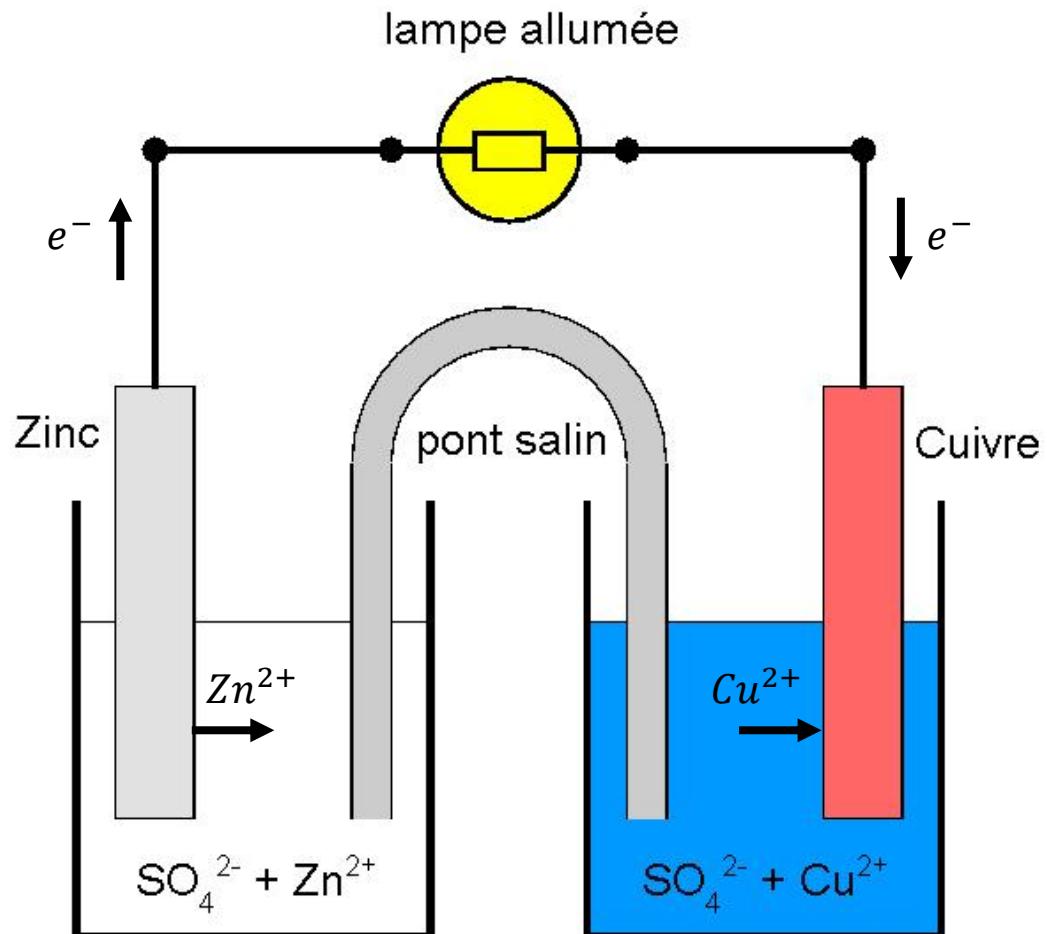
Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : sources d'énergie électrique*



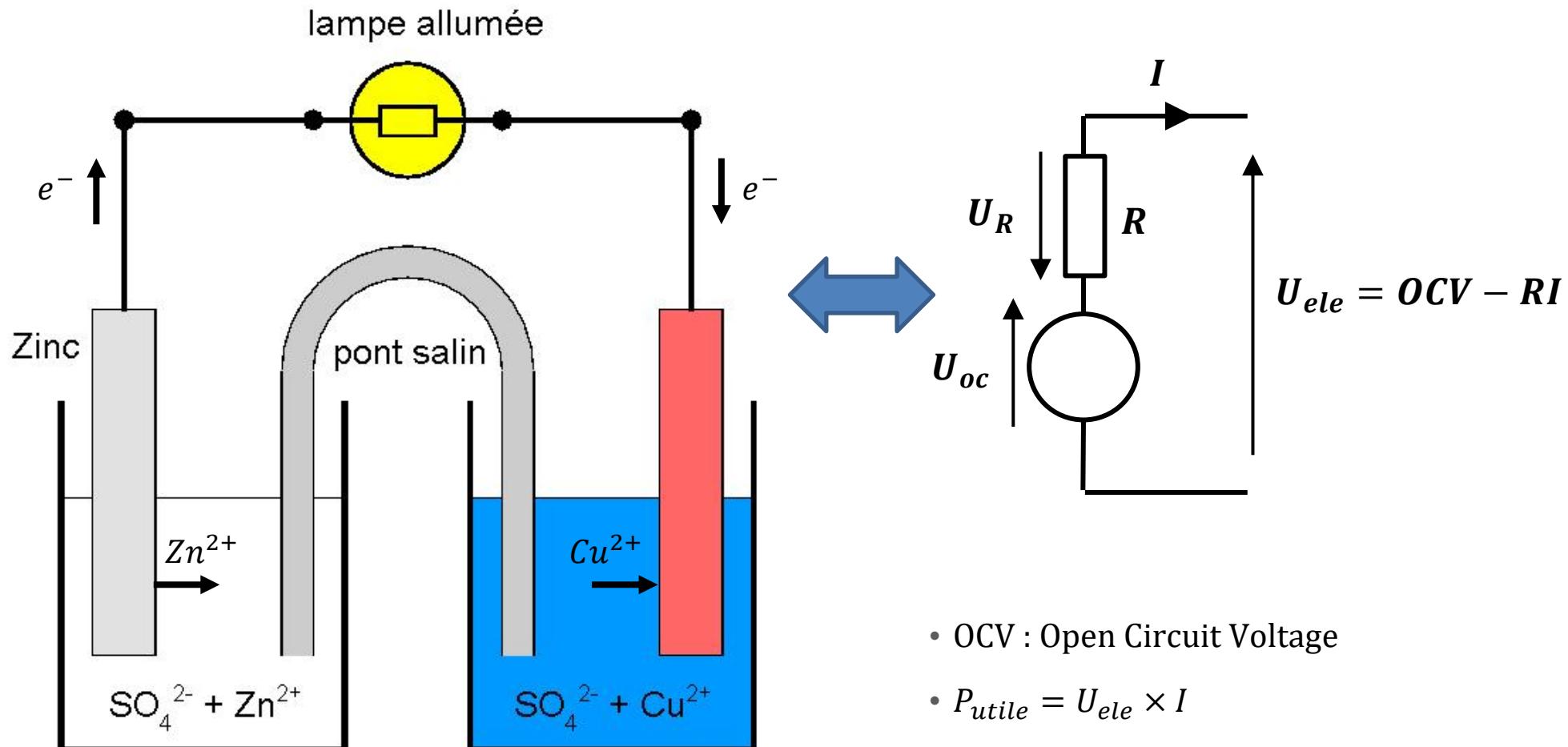
## Cellule électrochimique : principe de fonctionnement



- Réaction d'oxydo-réduction
  - Réduction : gain d'électrons
  - Oxydation : perte d'électrons
- Réactions en jeu
  - $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$
  - $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
- Bilan
  - $Zn + Cu^{2+} \rightarrow Zn^{2+} + Cu$
- Fonctionnement réversible
- Stocke ou fournit de l'énergie électrique



## Cellule électrochimique : modèle de Thévenin



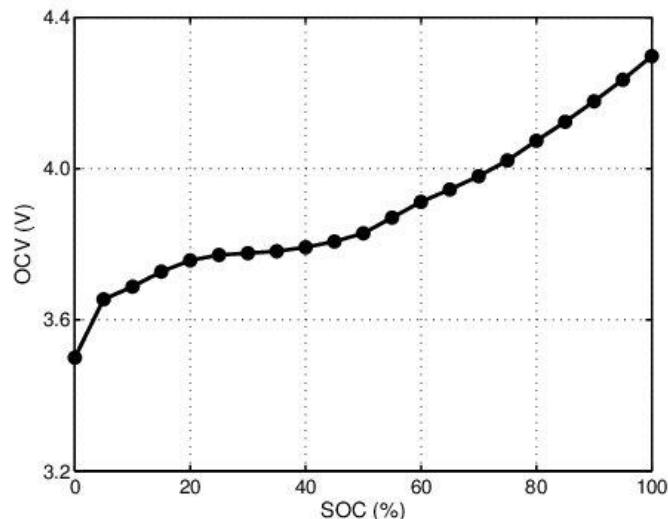
- OCV : Open Circuit Voltage
- $P_{utilie} = U_{ele} \times I$
- $pertes = R \times I^2$



## Non-linéarités

En réalité, l'OCV dépend de :

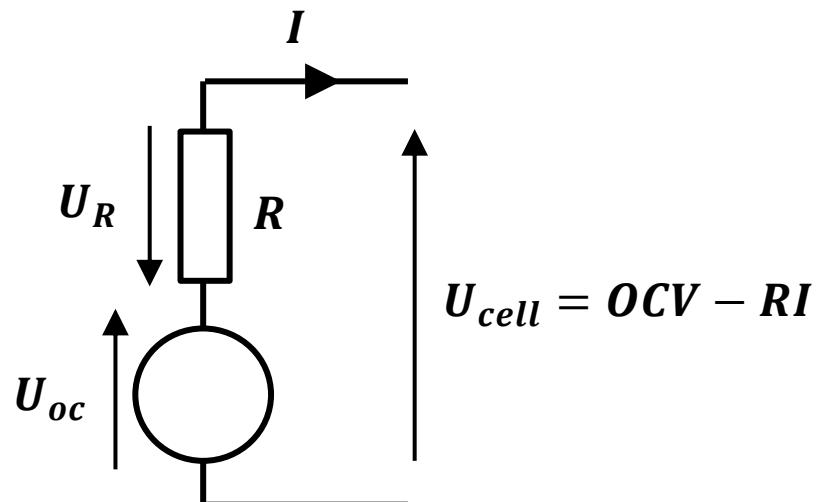
- la chimie utilisée ;
- la conception de la cellule ;
- l'état de charge (SoC : state of charge) ;
- l'état de santé.



OCV = f(SoC) pour une cellule NMC/graphite

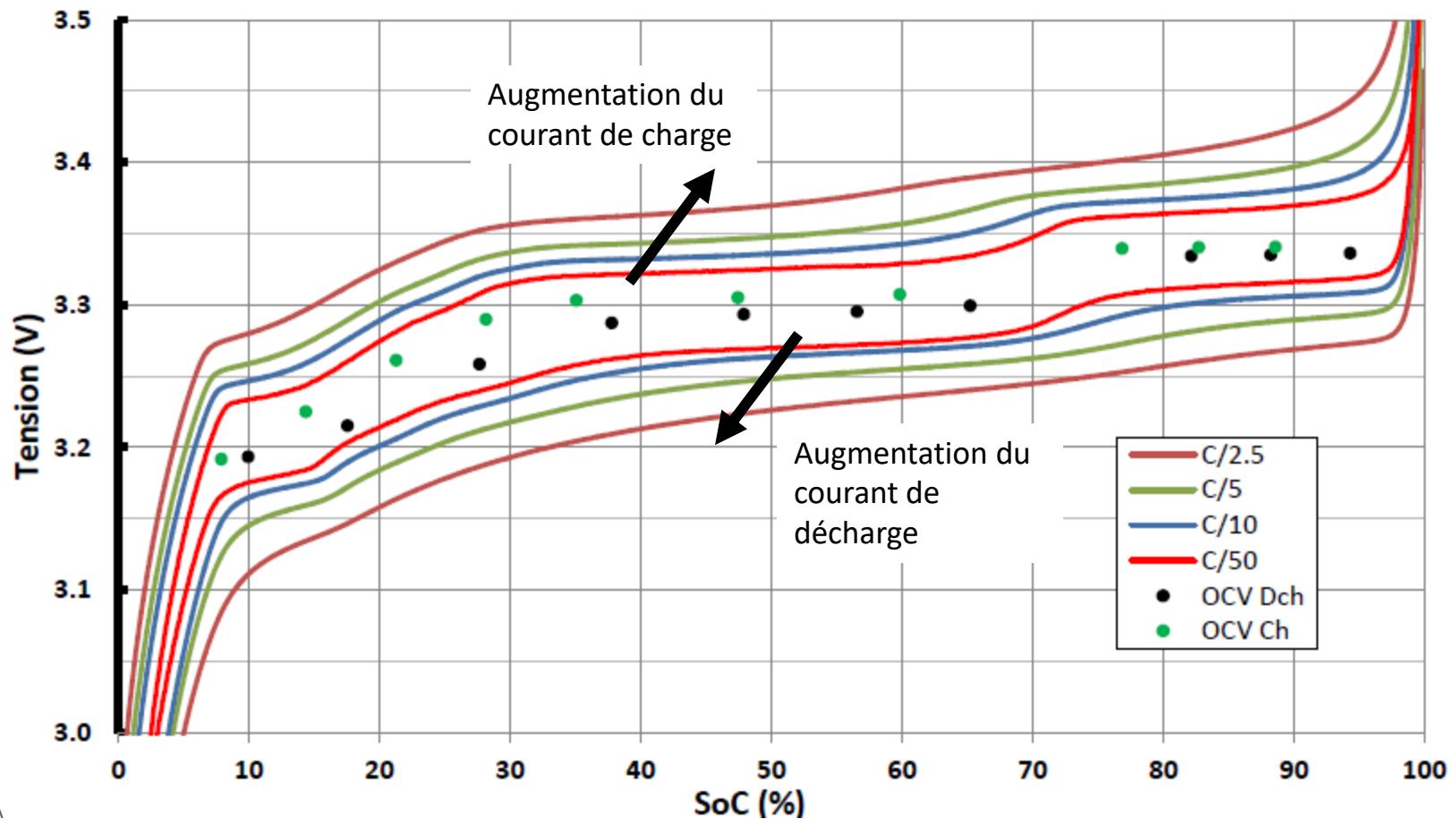
En réalité, la résistance interne dépend de :

- **l'état de charge** ;
- la **température** ;
- le courant ;
- l'état de santé ;
- etc...





## Influence du courant sur la tension



Nicolas DA

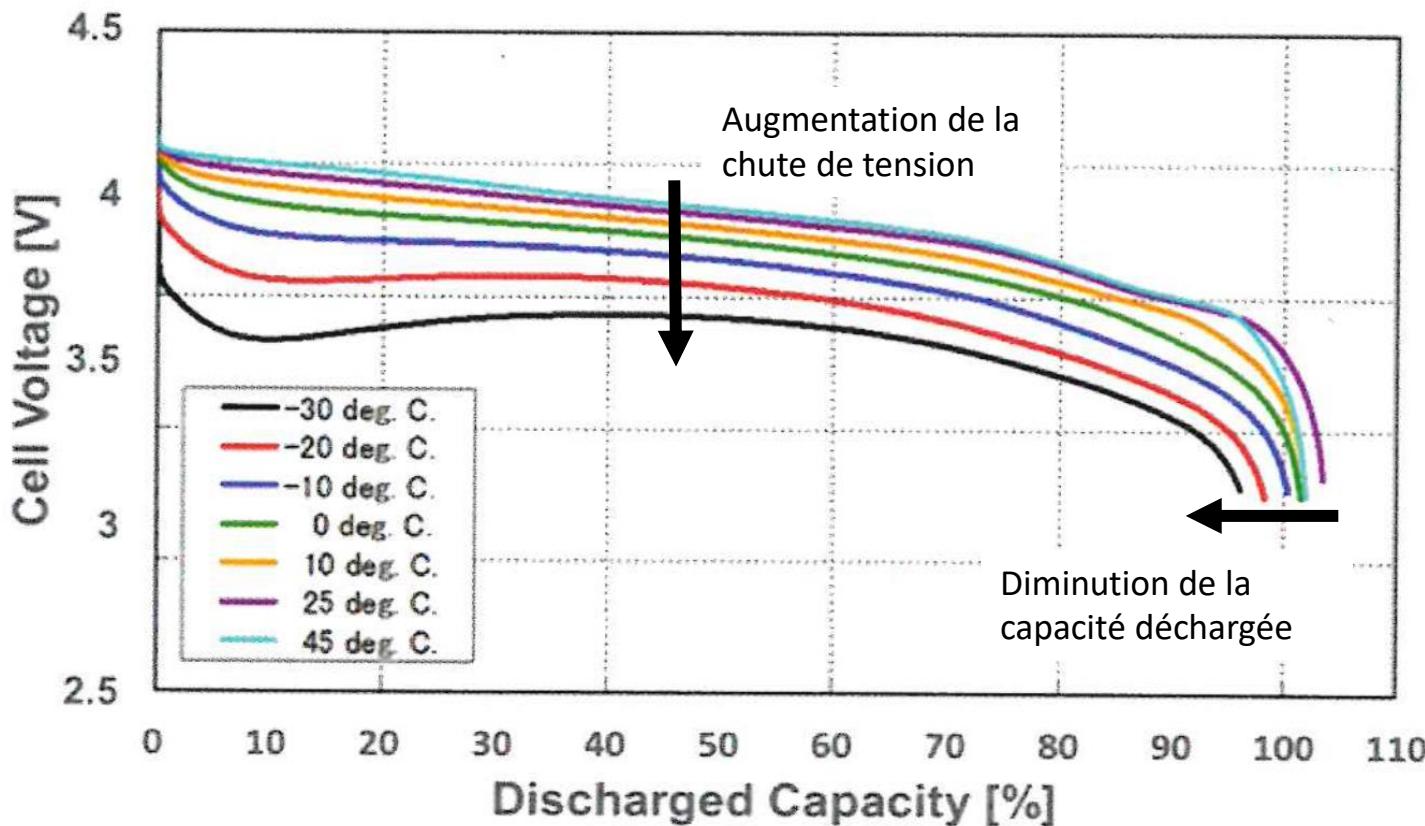
Maître de conférences  
Département IMwww.utc.fr  
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



## Dépendance en température

### Discharge Performance @1CA (LIM50H)



Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

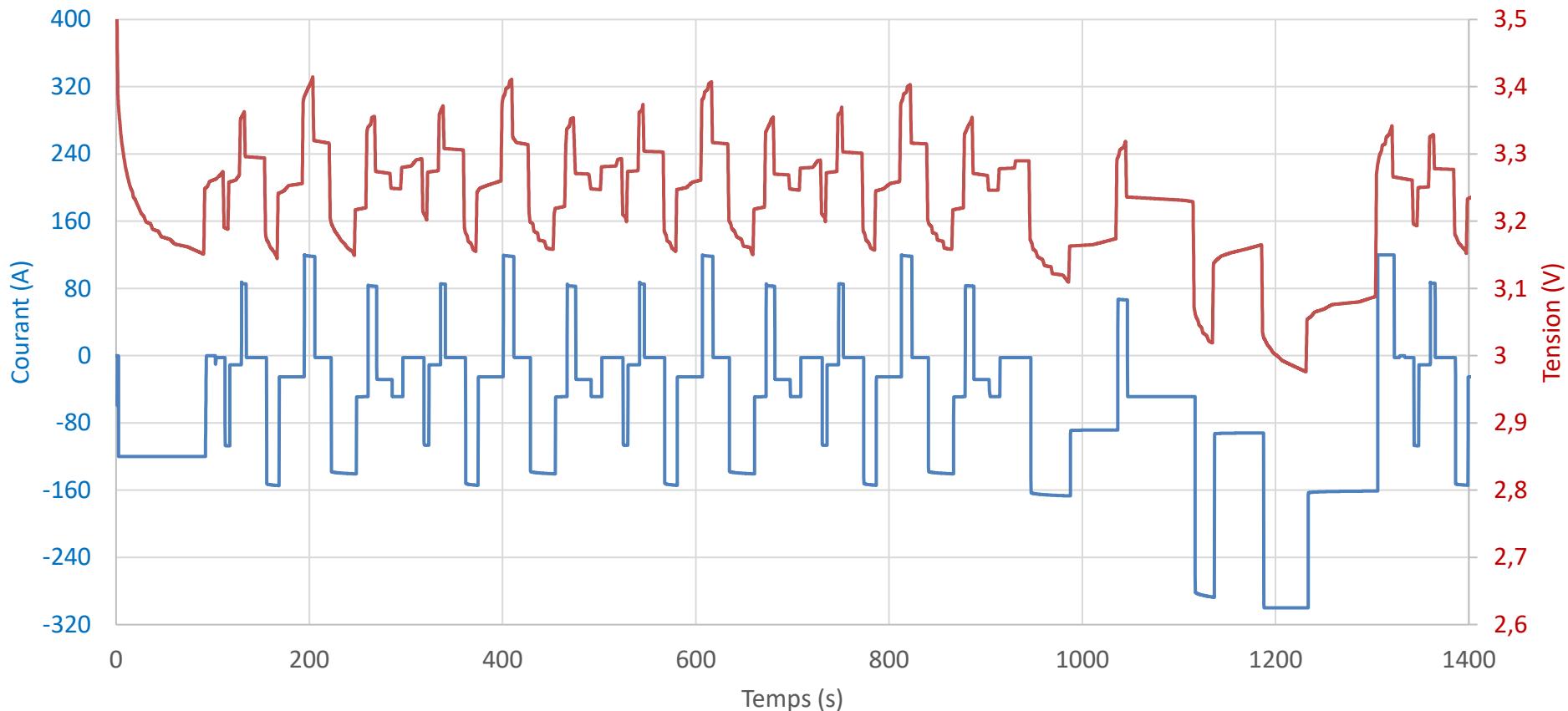
[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



## Exemple de profil réel

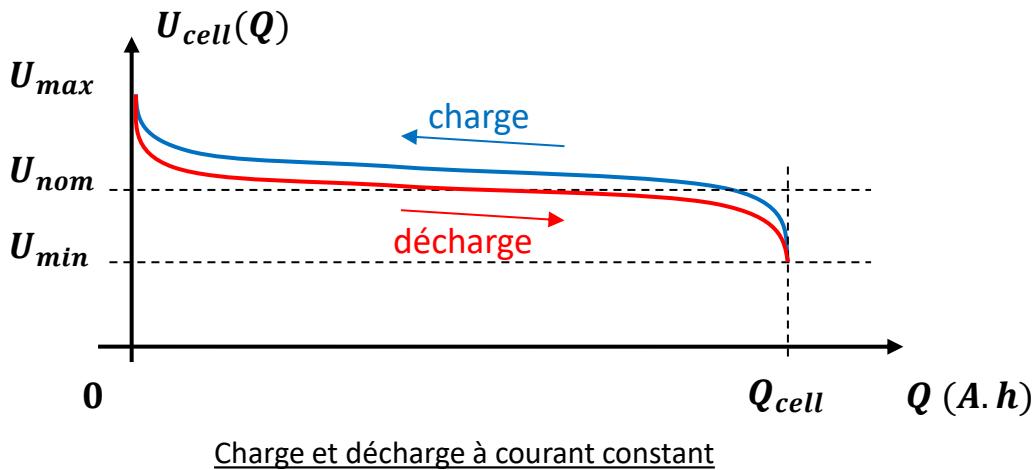
Module LFP/graphite de 100 Ah soumise à un cycle NEDC



- En SY03, nous utiliserons une **version simplifiée** de ce comportement.
- **Recherches dans notre équipe : modélisation du comportement réel (diagnostic, pronostic)**



## Modèle simplifié et caractéristiques principales

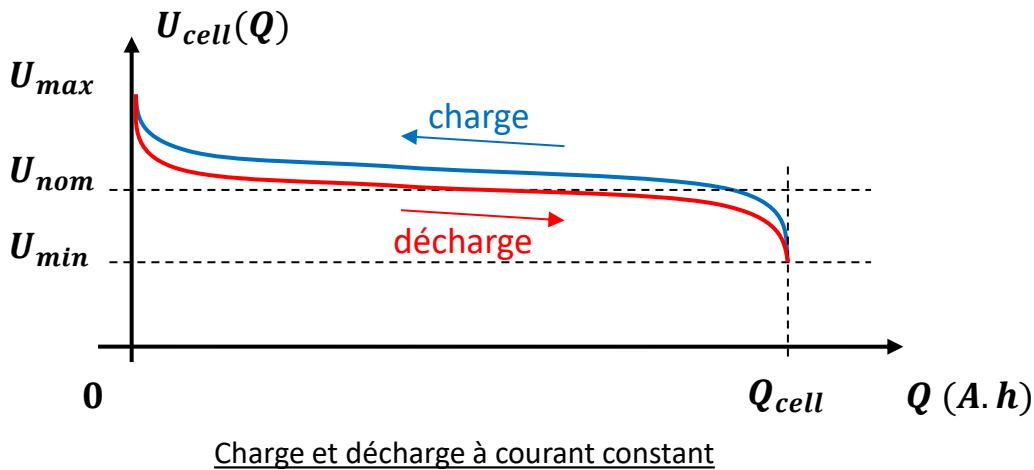


- Tension nominale  $U_{nom}$  = tension « typique » en décharge
- Courant nominal  $I_{nom}$  = courant permanent maximal (charge =/ $=$  décharge)
- Courant maximal  $I_{max}$  = courant maximal (*pour une durée courte*)
- Capacité  $Q_{cell}$  (A.h) : quantité de charges électriques stockées

/!\ Tension plus élevée en charge qu'en décharge /!\  
 (Note: The text is in French, indicating that the voltage is higher during charging than during discharging.)



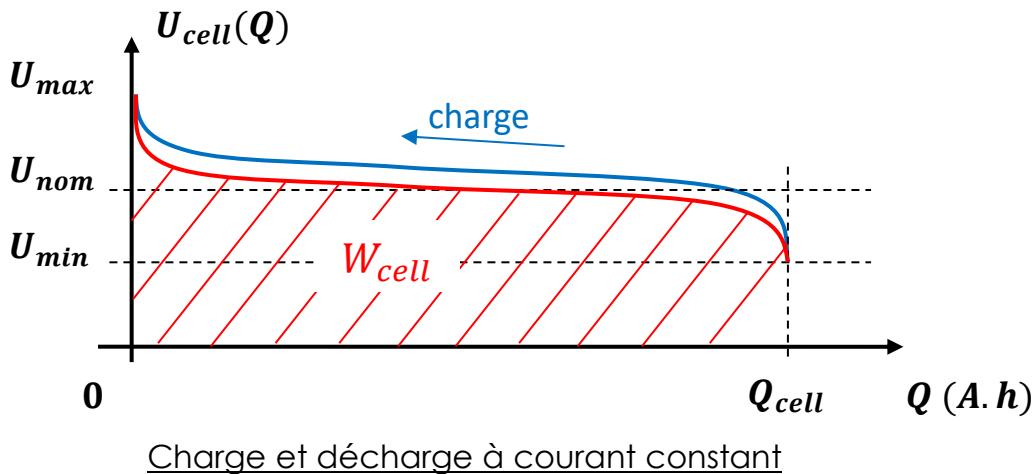
## Régime de courant



- « Décharge à 1C » signifie « toute la capacité vidée en 1h »
- Lors d'une décharge à « 2C », la cellule fournit deux fois plus de courant pendant deux fois moins longtemps.
- Règle pour une cellule de capacité  $Q$  avec un régime de courant de «  $nC$  » :
  - $I_{cell} = Q_{cell} * n$
  - $durée = 1/n$



## Puissance et énergie



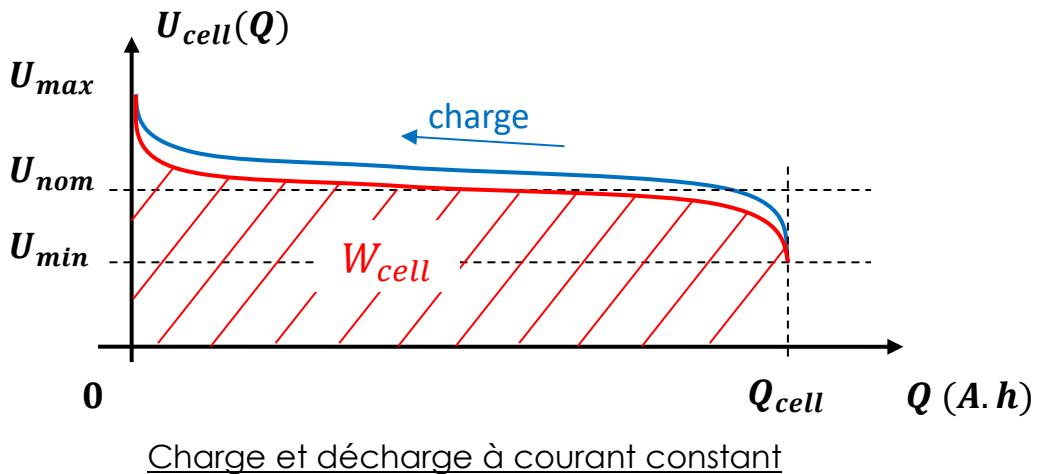
- Puissance instantanée max :  $p_{max} \approx u_{nom} \times i_{max}$  (souvent en décharge)  
En réalité, celle-ci dépend du SoC, de la température, de l'état de santé, du temps...
- Travail  $W_{cell}$  disponible en décharge :

$$W_{cell} = \int p(t) \cdot dt = \int U_{cell}(t) \times I_{cell}(t) \cdot dt \approx U_{nom} \times Q_{cell}$$

Remarque : en conditions adiabatiques, le travail est égal à l'énergie



## Rendement énergétique



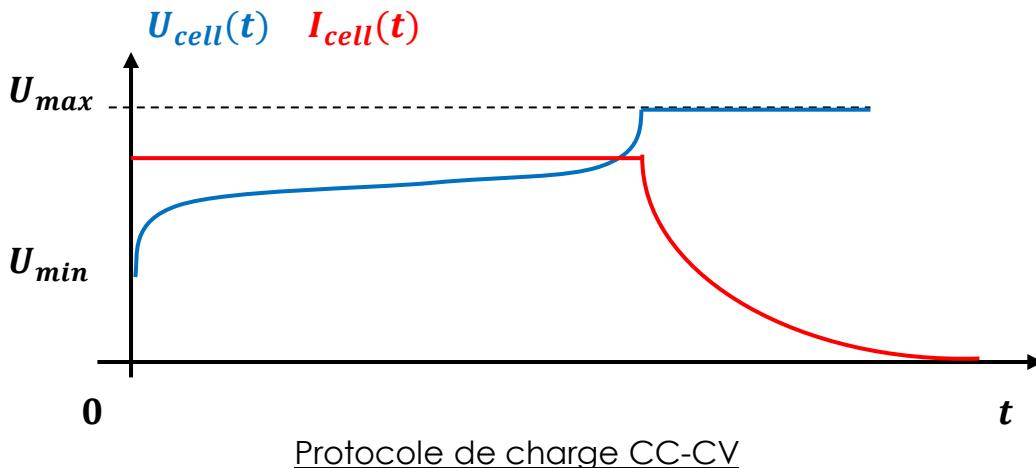
- Décharge :  $W_{cell} \approx U_{nom} \times Q_{ele}$
- Charge :  $W_{charge} > W_{cell}$  (car  $U_{charge} > U_{nom}$ )
- Rendement énergétique :  $\eta = \frac{W_{cell}}{W_{charge}}$
- /!\ Différent du rendement faradique :  $r_f = Q_{Dch}/Q_{Ch}$  ( $\approx 1$  pour le Li-ion)

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
nicolas.damay@utc.fr



## Protocole de charge classique



### 1) Phase de charge à courant constant (CC : *constant current*)

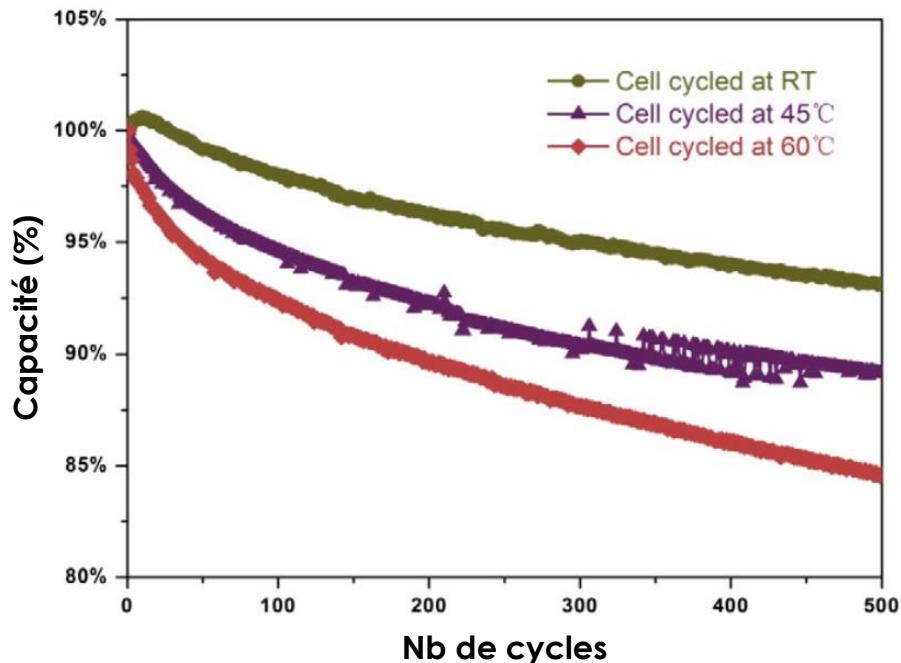
- Quand  $U_{cell} = U_{max}$  alors débute une seconde phase

### 2) Phase de charge à tension constante (CV : *constant voltage*)

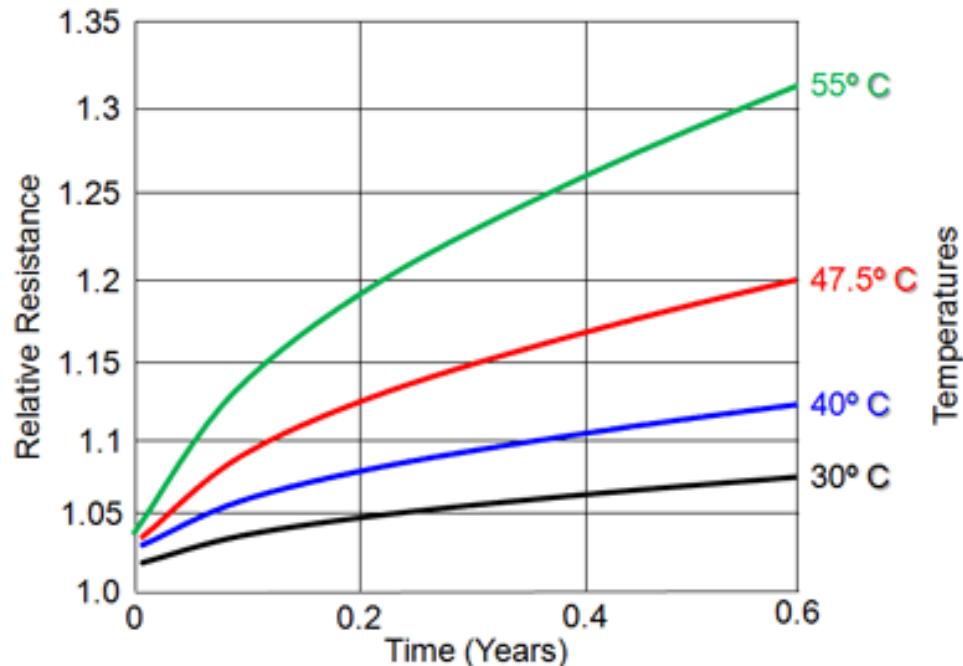
- Ceci permet de remplir au maximum la cellule
- **Recherches dans notre équipe : charge « au plus rapide »**



## Vieillissement « normal »



Réduction de capacité



Augmentation de résistance interne

- Deux conséquences principales : **perte d'énergie et perte de puissance**
- **Recherches dans notre équipe : diagnostic + prédition du vieillissement**



## Vieillissement « normal »

- Phénomène très complexe à modéliser
- Thèses en cours sur ce sujet très actuel (*garanties, efficacité...*)
  - Diagnostic des batteries ?
  - Durée de vie en fonction de l'utilisation ?
  - Seconde vie des batteries ?
- Pour les utilisateurs, la durée de vie d'une batterie est caractérisée par son « nombre de cycles » :
  - Définition : **nombre de charge/décharge avant d'avoir perdu 20% de capacité**
  - **Cette « cyclabilité » dépend de la technologie, mais aussi du fabricant de batterie**



	Carbone-Zinc	Alkaline Manganèse	Argent	Zinc Air	Plomb	Nickel Cadmium	Nickel Métal hydrure	Lithium-ion	Na-ion – Li-air – LiC – NiH <sub>2</sub> ...
Tension à vide (V)	1,5	1,5	1,6	1,45	2	1,3	1,2	3,3 à 4	En développement dans les labos...
Tension nominale (V)	0,8	0,8	0,9	1,1	1,7	1	1	3,2 à 3,7	
Énergie massique (Wh/kg)	40	55	80	180	20-40	40 à 60	30 à 80	75 à 190	
Énergie volumique (Wh/L)	80	125 à 200	450	240	40 à 100	50 à 150	140 à 300	160 à 1000	
Puissance massique (W/kg)					120	220	370	260	
Puissance volumique (W/L)					250	430	880	400	
Taux de décharge	bas	bas	bas	très bas	haut	très haut		très haut	
Électrode positive	Mn O <sub>2</sub> + C	Zn	Zn	O <sub>2</sub>	Pb O <sub>2</sub>	Ni O OH	Ni	LCO – NMC – LMO – LFP - NCA	
Électrode négative	Zn	Mn O <sub>2</sub>	Ag O <sub>2</sub>	Zn	Pb	Cd	hydrure métallique	Lithium métal – Graphite - LTO	
Électrolyte	NH <sub>4</sub> Cl Zn Cl eau	KOH + eau	KOH + eau	KOH + eau	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + eau	KOH + eau		LiPF <sub>6</sub> , autres	
Aptitude au stockage (ans)	1 à 3	4 à 5	4 à 5	3 à 4	0,1 à 0,3	0,3 à 0,5			
Durée de vie					5 à 20 ans	10 à 20 2000 cycles	1200 cycles	1000 cycles	
Recharge (h)					> 8	8	< 6	< 3	

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

www.utc.fr  
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



# Sources réversibles

## Mise en œuvre

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : sources d'énergie électrique*

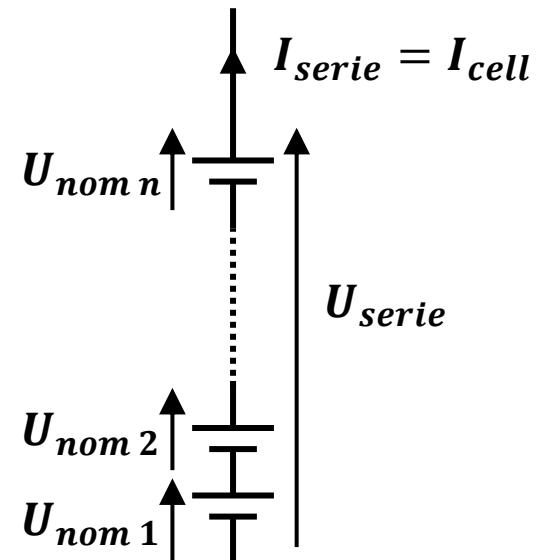


## Augmentation de la tension - Association en série

- Tension nominale  $U_{nom}$  assez faible pour un élément seul
- Association de  $n$  éléments en série pour augmenter la tension

$$U_{serie} = n \times U_{nom}$$

- Tous les éléments sont traversés par le même courant
- $I_{nom,serie} = I_{nom,cell}$  et  $I_{max,serie} = I_{max,cell}$
- La capacité de cette série ne change pas
- **En supposant que le travail est égal à l'énergie :**
- L'énergie de cette série vaut  $E_{serie} = n \times E_{cell}$
- La puissance max vaut  $p_{serie,max} \approx (n \times u_{nom}) \times i_{max,cell}$



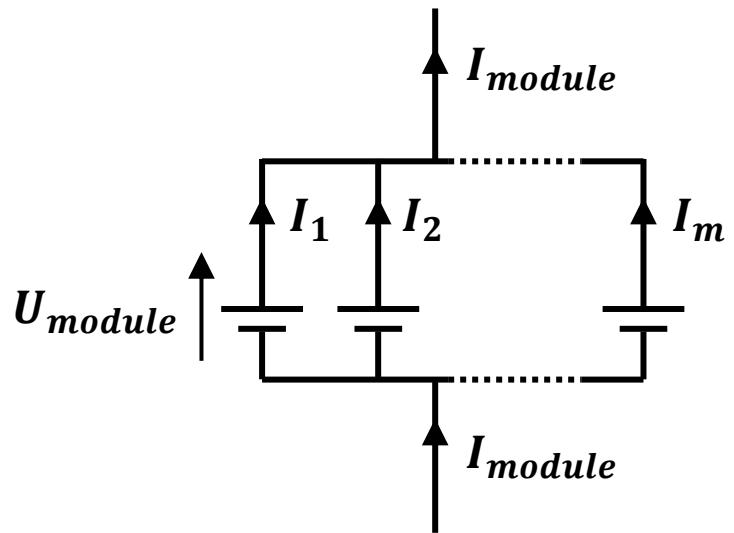


## Augmentation de courant/capacité - Association en parallèle

- Courant  $I_{cell}$  ou capacité  $Q_{cell}$  parfois trop faibles pour un élément seul
- Association de  $m$  éléments en parallèle pour augmenter courant/capacité

$$I_{module} = m \times I_{cell}$$

- L'ensemble est appelé « module »
- Tous les éléments ont la même tension
- $U_{module} = U_{cell}$
- L'énergie de cet ensemble vaut  $E_{paral} = m \times E_{cell}$
- La puissance max vaut  $p_{module,max} \approx u_{nom} \times (m \times i_{max,cell})$

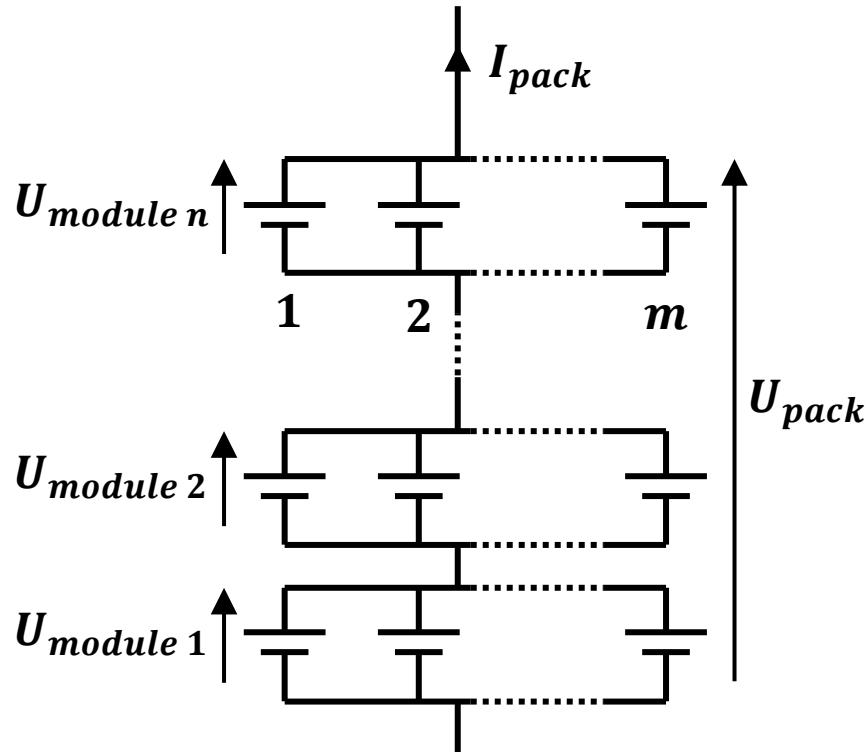




## Association mixte : assemblage en série et en parallèle

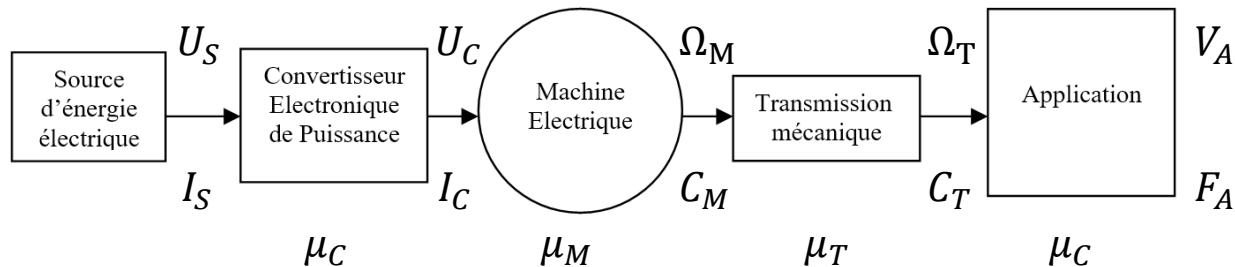
- L'ensemble est appelé « pack batterie »
- Il permet d'atteindre les performances voulues
- Tension :  $U_{pack} = n \times U_{cell}$
- Courant :  $I_{pack} = m \times I_{cell}$
- Capacité :  $Q_{pack} = m \times Q_{cell}$
- Énergie :  $E_{pack} = n \times m \times E_{cell}$
- Puissance max :

$$p_{pack,max} \approx (n \times u_{cell}) \times (m \times i_{max,cell})$$





## Pack batterie : vérification du cahier des charges



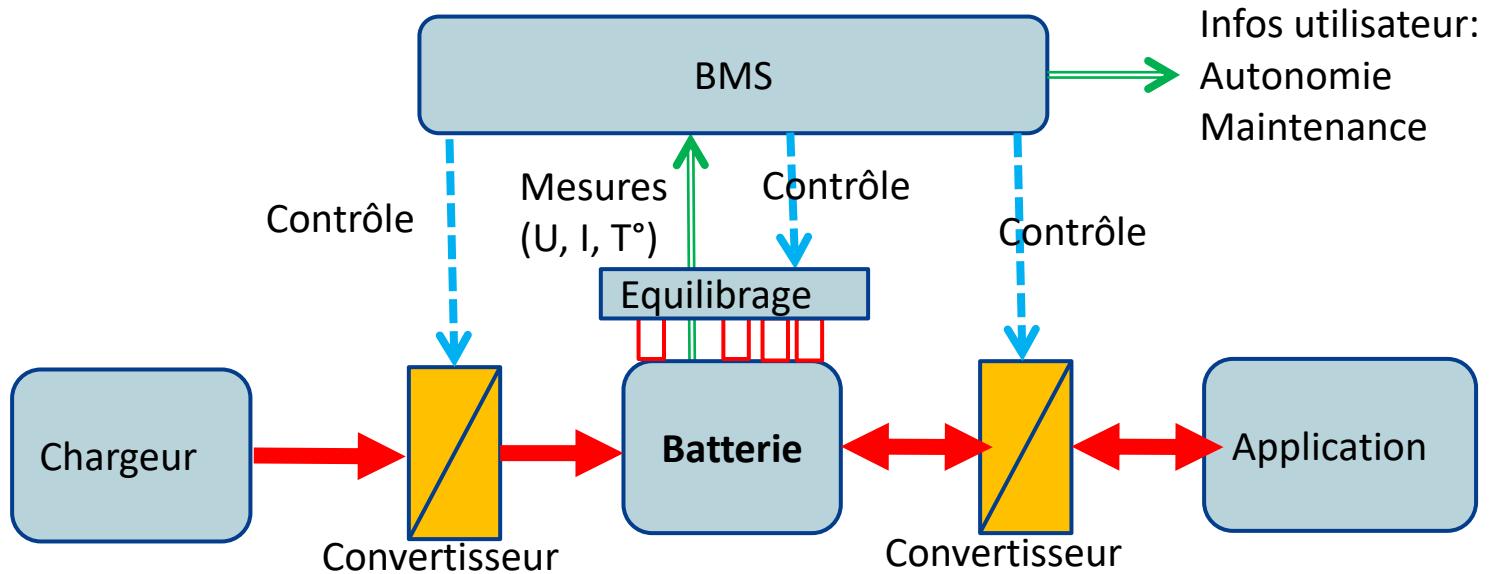
### Critères à vérifier

- Tension :  $U_S = U_{pack} > U_{moteur,max}/\eta_C$  (pour un CEP abaisseur de tension)
  - Attention en alternatif, il faut se baser sur l'amplitude de la tension (pas la valeur efficace)
- Puissance nominale :  $P_{S,nom} = P_{pack,nom} > P_{moteur,nom}$
- Puissance max :  $P_{S,max} = P_{pack,max} > P_{moteur,max}$
- Énergie :  $E_{pack} > E_{besoin}$  (/!\ attention aux rendements /!\ $\backslash$ )
- Capacité :  $Q_{pack} > Q_{besoin} = E_{besoin}/U_{pack}$



## Pack batterie : *Battery Management System (BMS)*

- Surveillance des tensions des modules :  $U_{min} < U_{module\ i} < U_{max}$
- Surveillance du courant :  $I_{Ch,max} < I_{pack} < I_{Dch,max}$
- Surveillance de l'état de charge :  $0\% < SoC < 100\%$  (*SoC* : *State of Charge*)
- Surveillance en température
- Retour d'informations à l'utilisateur
- Equilibrage (charge)





# Sources réversibles

## Cas du lithium-ion

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

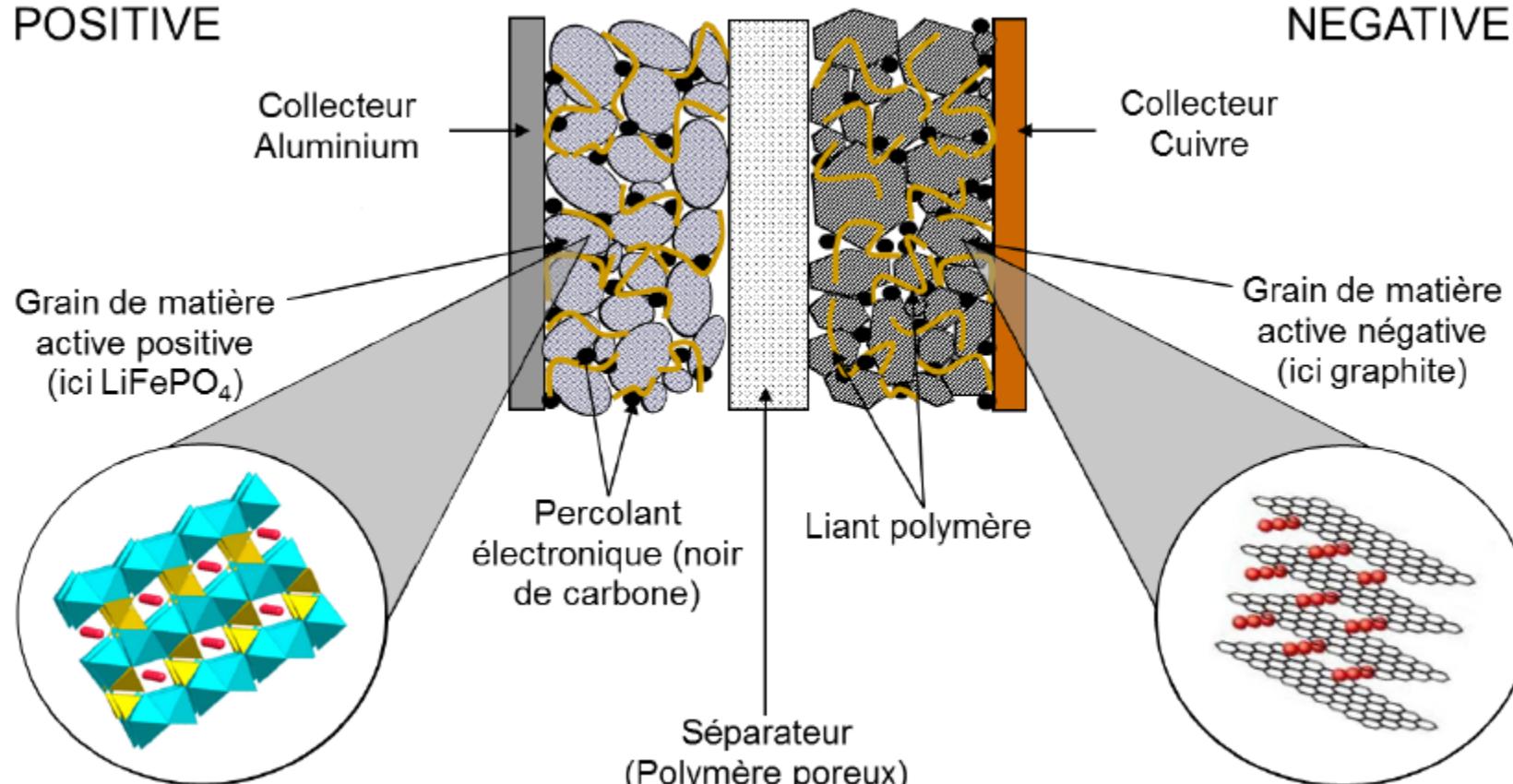
[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : sources d'énergie électrique*



## Constitution d'une batterie lithium-ion

POSITIVE



Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

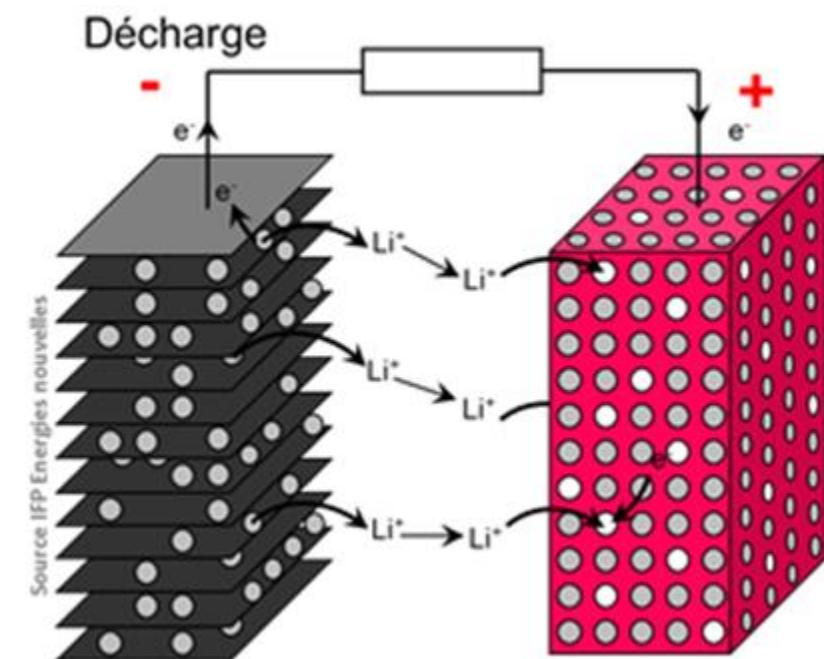
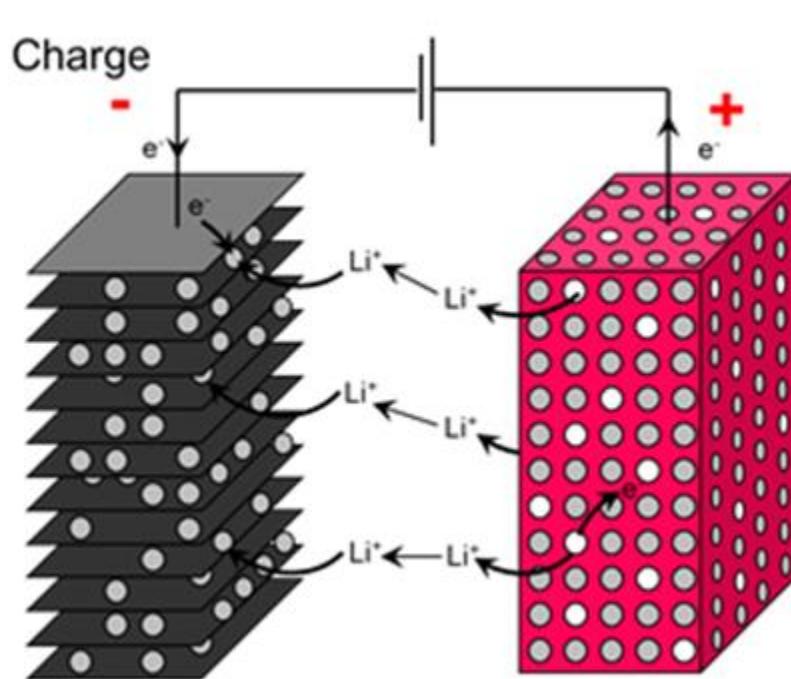
www.utc.fr  
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique

Source : IFPEN



## Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion



Insertion

des ions  $Li^+$  dans les plans de carbone

déinsertion

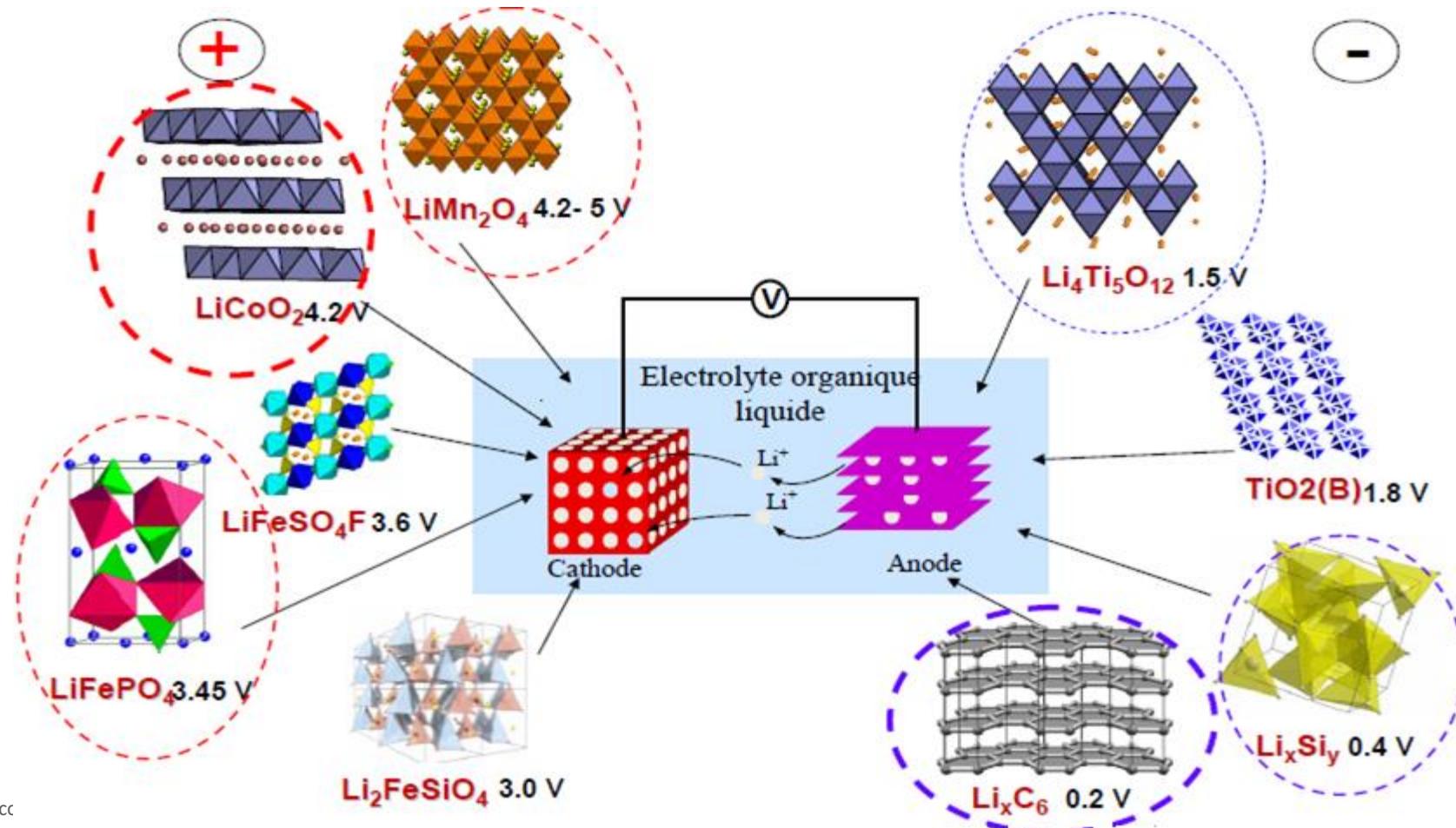
Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



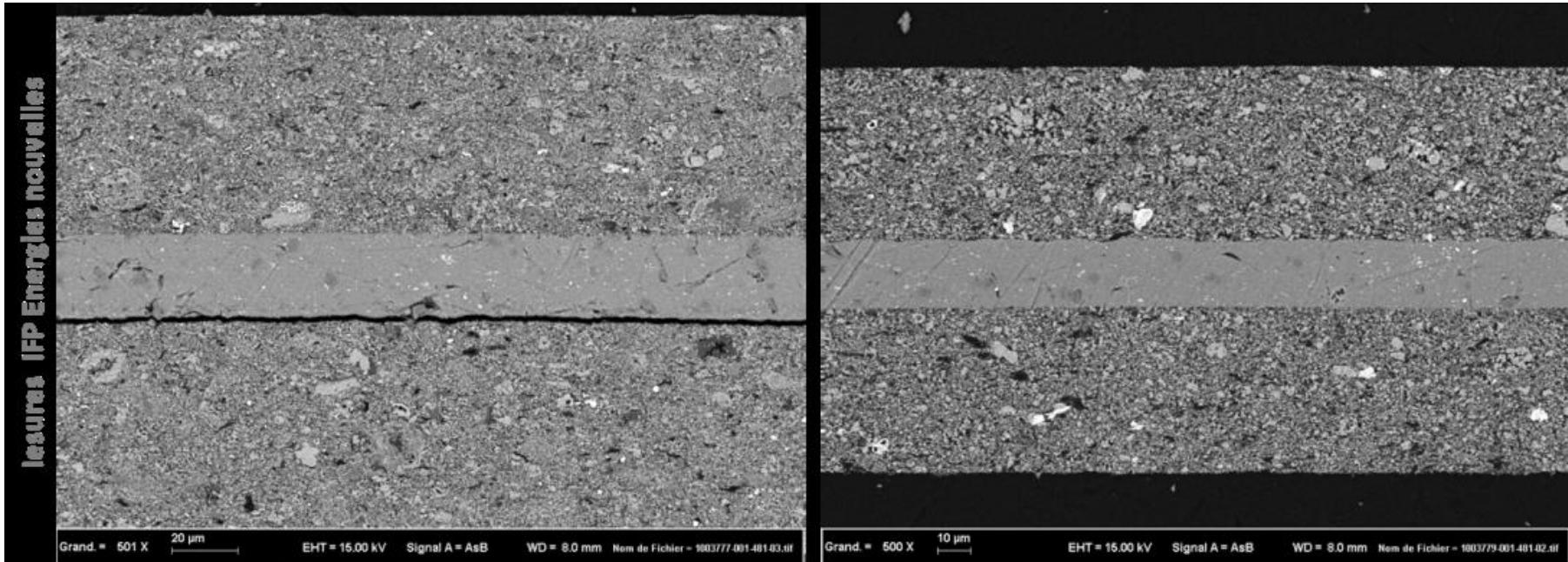
## Principales combinaisons de matériaux



Source : JM Tarascon



## Typage : Energie ou Puissance



vue MEB en coupe de l'épaisseur d'une électrode positive  
LFP (électrode/  
collecteur/électrode) de cellules Lifebatt 15 Ah typée  
énergie (à gauche) et 8 Ah typée puissance  
(à droite)

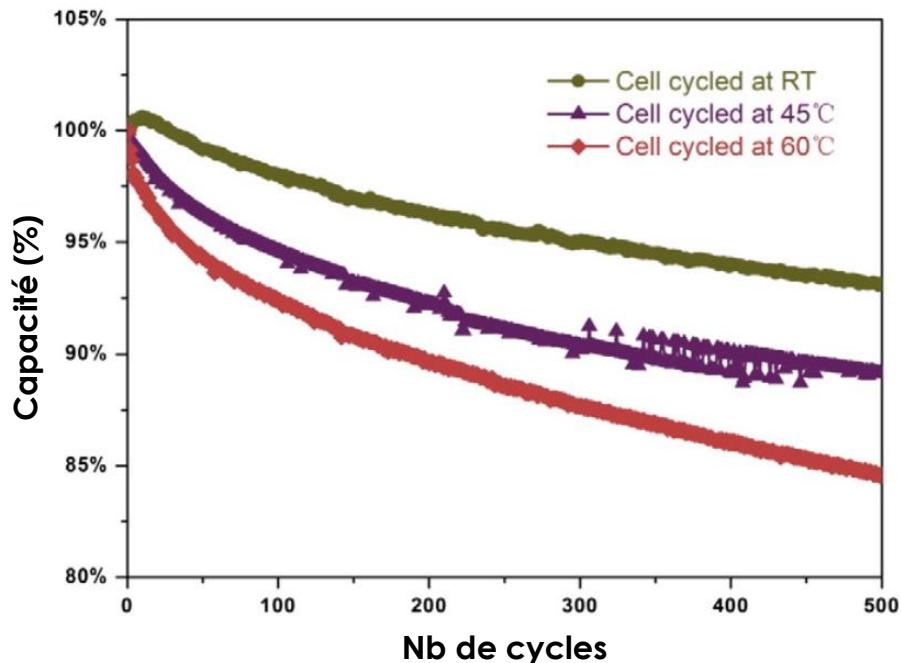
Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

www.utc.fr  
nicolas.damay@utc.fr

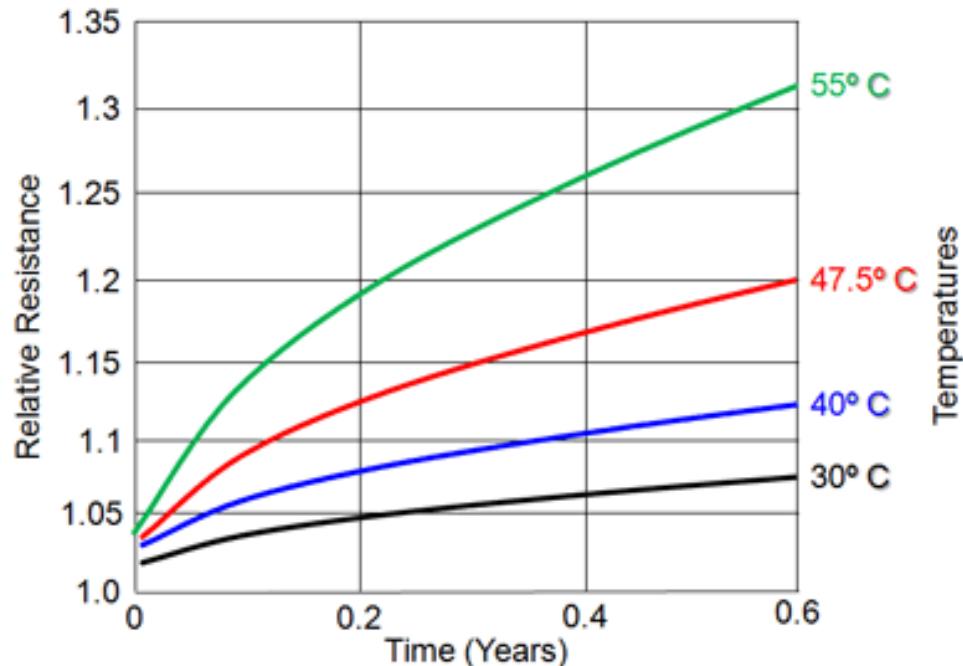
Cours SY03 : sources d'énergie électrique



## Vieillissement « normal » (rappels)



Réduction de capacité

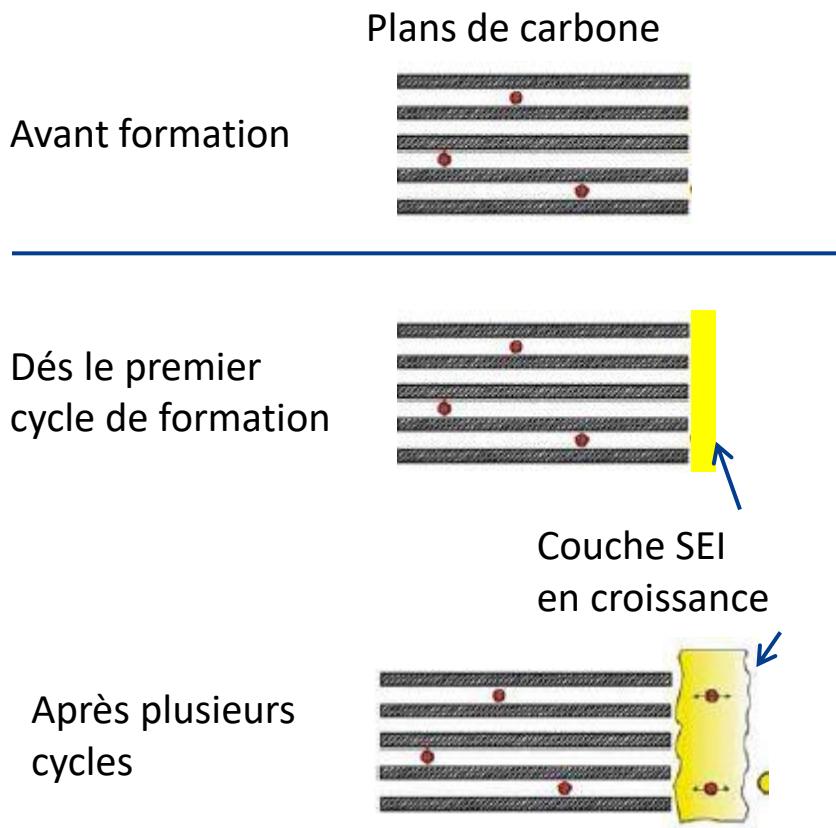


Augmentation de résistance interne

- Perte d'énergie et perte de puissance
- Phénomène favorisé à haute température et à haut état de charge
- Une des causes principales : **croissance d'une couche de passivation (SEI)**



## Vieillissement : augmentation de la SEI



### SEI = Solid Electrolyte Interphase

Membrane poreuse formée dès le premier cycle,  
La porosité permet l'absorption des ions Li+  
au sein des plans de carbone de l'électrode  
négative et limite le transfert de ces ions  
vers l'électrolyte

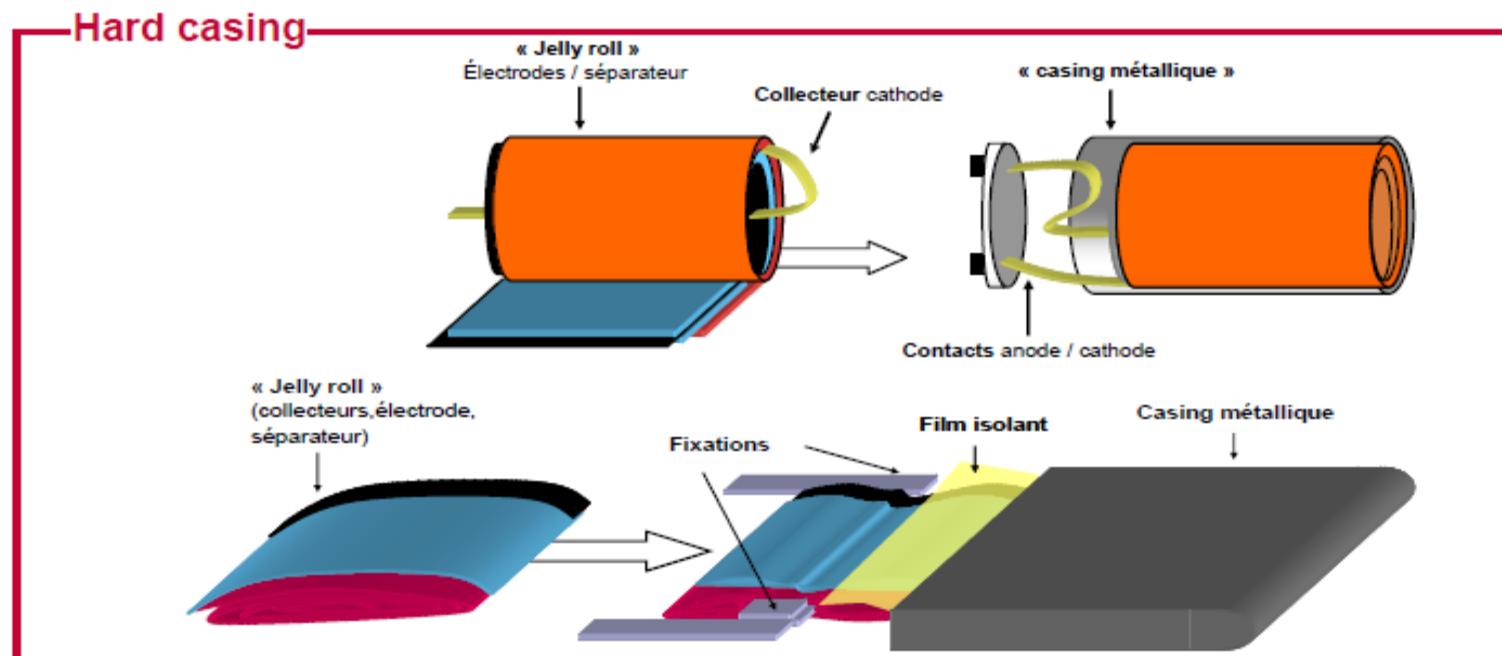
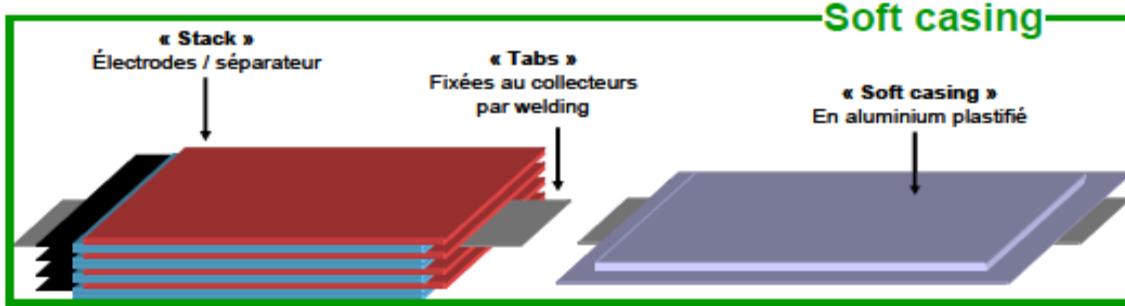
### Evolution de la SEI

- Augmentation de la couche
- Changement de structure, de densité
- Fracturation, détérioration

La croissance de la SEI entraîne  
une consommation irreversible d'ions Li+  
qui entraîne une diminution des ions cyclables  
**=> Diminution de capacité**  
**=> Augmentation de la résistance**



## Design des cellules Li-ion

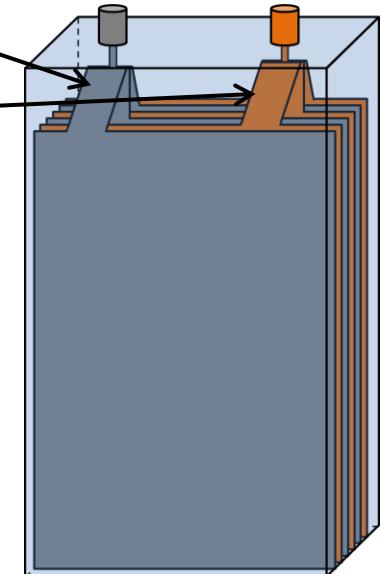




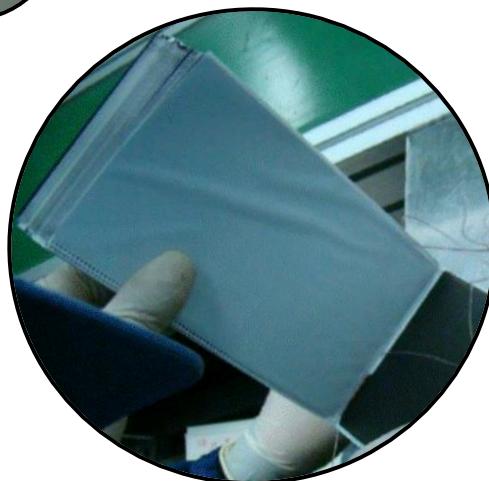
## Constitution d'une cellule Li-ion



Connexions entre les collecteurs et les bornes



Eléments électrochimiques



Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
nicolas.damay@utc.fr

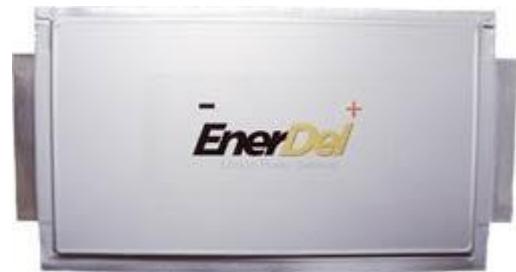
Cours SY03 : sources d'énergie électrique



## Cylindrical Cell (Hardcase)



## Pouch Cell (Softpack)



## Prismatic Cell (Hardcase)



Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

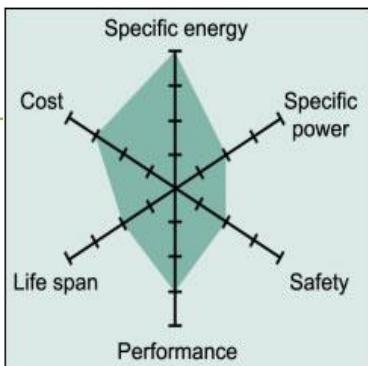
www.utc.fr  
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique

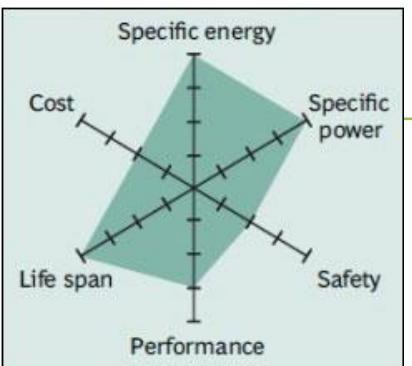


Abréviation	Matériau électrode positive	Matériau électrode négative	Tension nominale (V)	Tension utile (V)	Energie massique pratique (Wh/kg)
LCO	LiCoO <sub>2</sub>	C	3,6	4.1 – 3.3	150
NCA	LiNiCoAlO <sub>2</sub>	C	3,6	4.1 – 3.3	150
NMC	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	C	3,6	4.1 – 3.3	145 – 160
LMO	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	C	3,8	4.1 – 3.7	110 – 120
LFP	LiFePO <sub>4</sub>	C	3,2	3.3 – 3.0	100 – 110
LTO *	LiFePO <sub>4</sub>	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	2	2.0 – 1.8	50 – 70

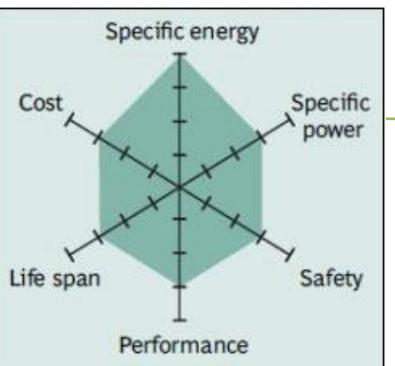
\* dédiée charges rapides



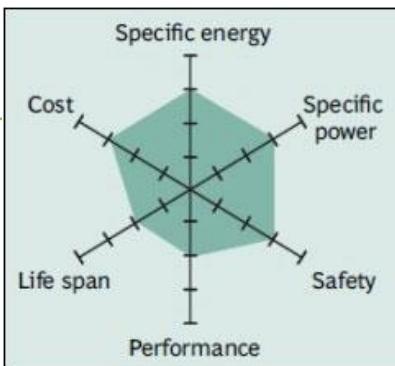
LCO



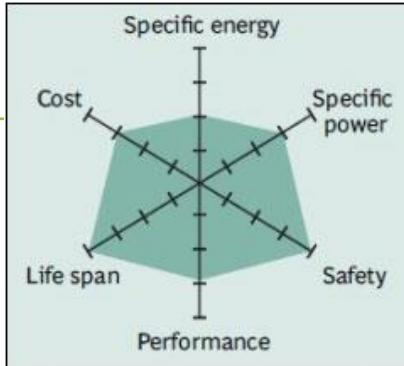
NCA



NMC



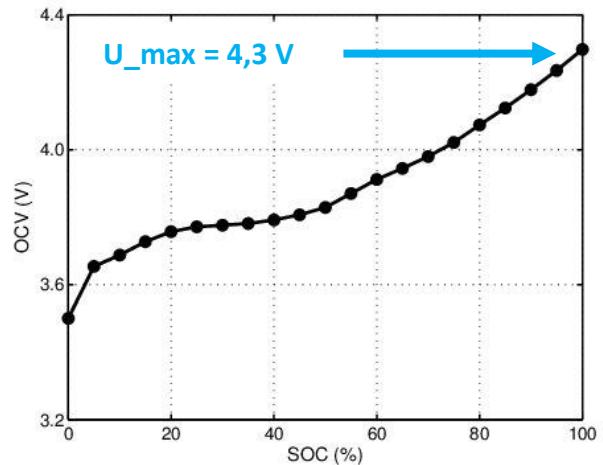
LMO



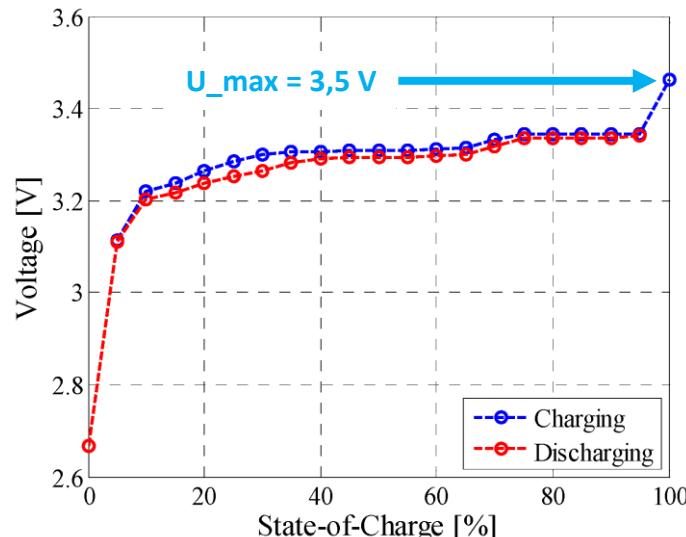
LFP



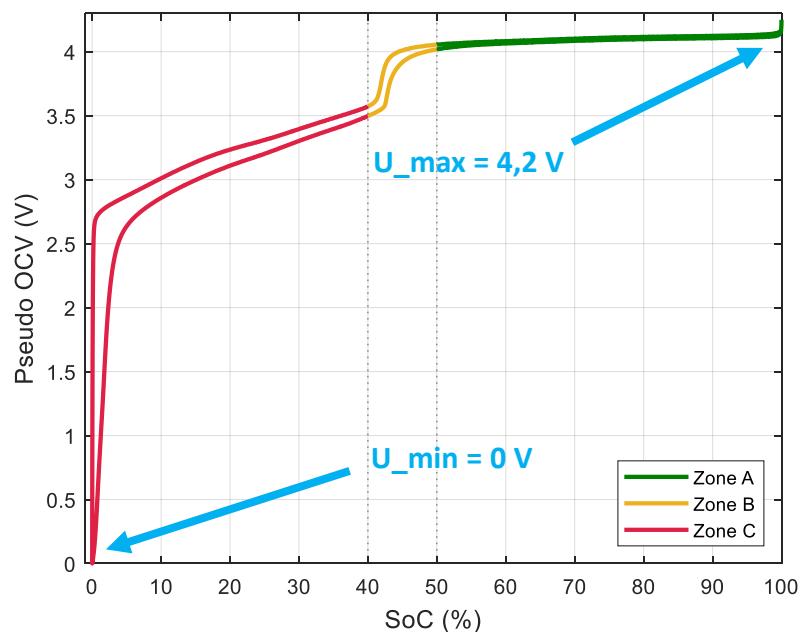
## A chaque chimie son OCV en fonction du SoC



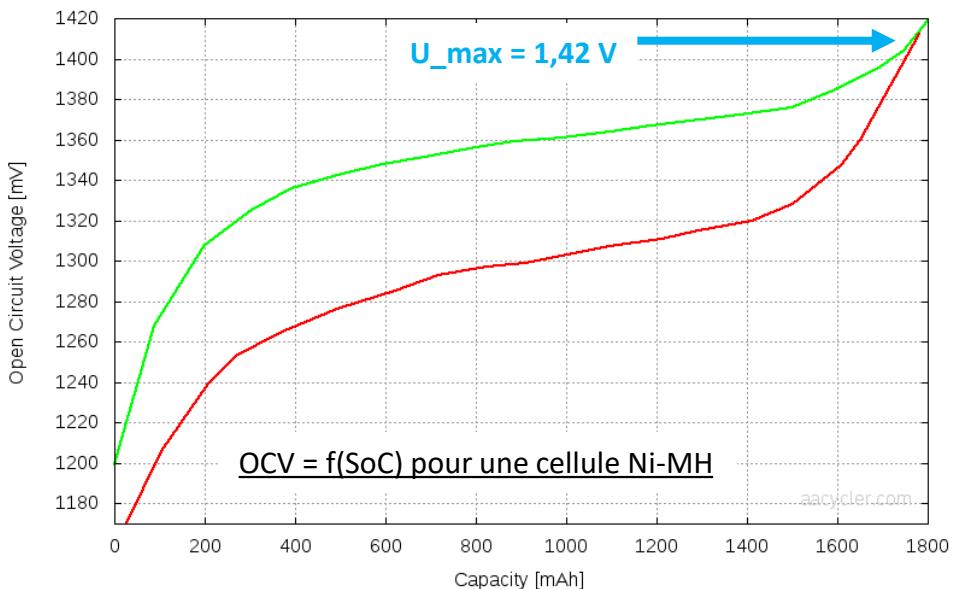
OCV = f(SoC) pour une cellule NMC/graphite



OCV = f(SoC) pour une cellule LFP/graphite



Cas du sodium-ion (Tiamat, France)





## Surveillance de l'état de charge

- Important pour connaître l'énergie restante dans la batterie
- Peut permettre d'adapter l'utilisation de la batterie à bas SoC
  - Modes dégradés, respect de la limite basse en tension

## Estimation de l'état de charge

- Mesure de l'OCV au repos (après plusieurs heures sans courant)
  - $OCV = f(\text{SoC})$  donc  $\text{SoC} = f^{-1}(OCV)$
- Comptage coulométrique

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \int_0^t I \cdot dt \text{ (en A.s)}$$

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \int_0^t \frac{I}{3600} \cdot dt \text{ (en A.h)}$$

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \int_0^t \frac{I}{3600 \times Q_{cell}} \cdot dt \text{ (valeur entre 0 et 1)}$$



# Sources réversibles

## Divers

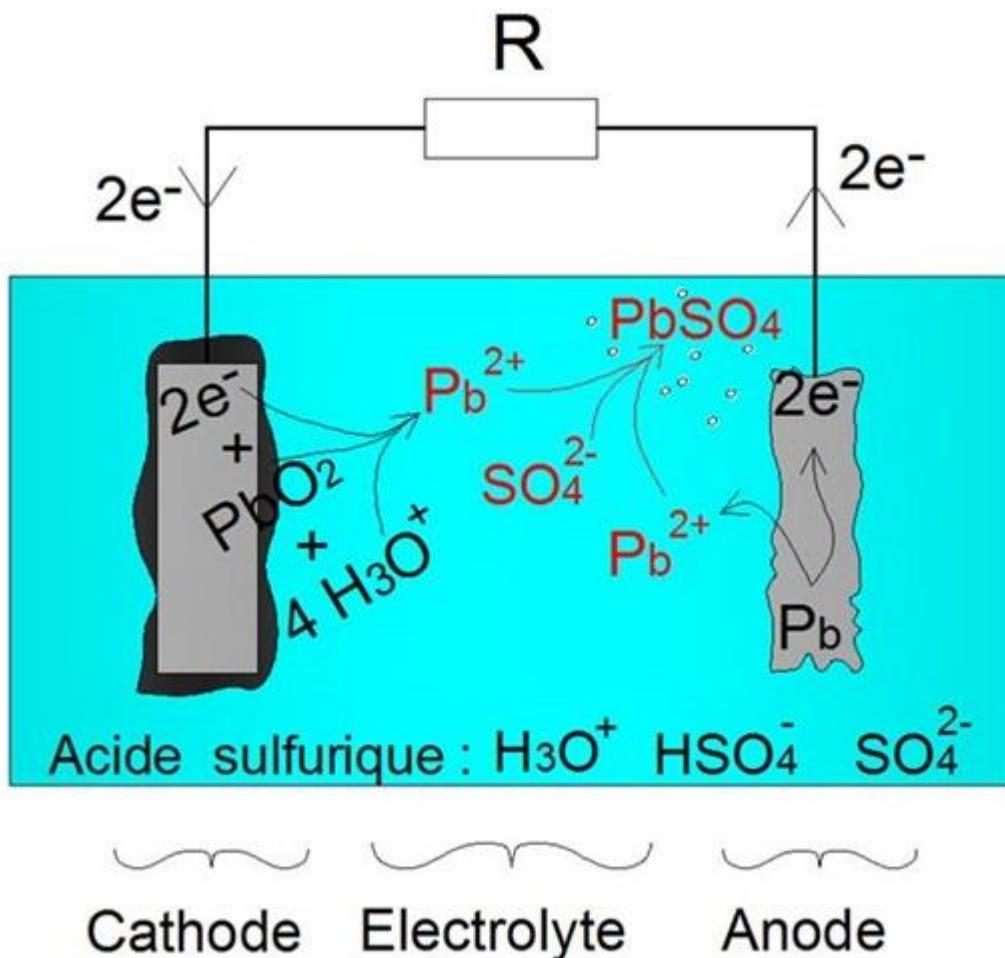
Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : sources d'énergie électrique*



## Batteries acide-plomb



- Inventées dans les années 1850
- Grilles de plomb « durci » (alliage)
- Electrolyte = acide sulfurique
- Plomb  $\leftrightarrow$  Oxyde de plomb
- Densité d'énergie : 20-40 Wh/kg
- Environ 2V / éléments
- Charge possible sans chargeur
  - MAIS électrolyse de l'eau à 2,34 V ( $2 \text{ H}_2 + \text{O}_2$ )
- Recyclable à l'infini ( $\approx 100\%$ )



## Exemples de la batterie 12V classique

- 6 éléments de 2 V
- Courant max : plusieurs centaines d'ampères (démarrage)



Batterie 12V ouverte

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

www.utc.fr  
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



## Nickel-Cadmium (Ni-Cd)

- Inventées vers 1899
- Densité d'énergie : 40-60 Wh/kg
- Environ 1,2V / éléments
- Effet mémoire (sauf avec une décharge complète jusqu'à 1V)

## Nickel-métal hydrure (Ni-MH)

- Commercialisées vers 1990
- Pas de constituant très polluant comme le plomb ou le cadmium
- Densité d'énergie : 30 à 80 Wh/kg (*2 fois plus que acide-plomb*)
- Environ 1,2V / éléments
- Effet mémoire faible



## Li-Po (en réalité du lithium-ion)

- Inventées vers 1970
- Electrolyte = polymère gélifié
- Densité d'énergie : 100-130 Wh/kg
- Environ 3,7V / éléments
- Régimes de décharge très élevés (20C, 50C...)

## Technologies en maturation

- Sodium-ion
- Batteries « tout-solide »
- Lithium souffre
- Etc...



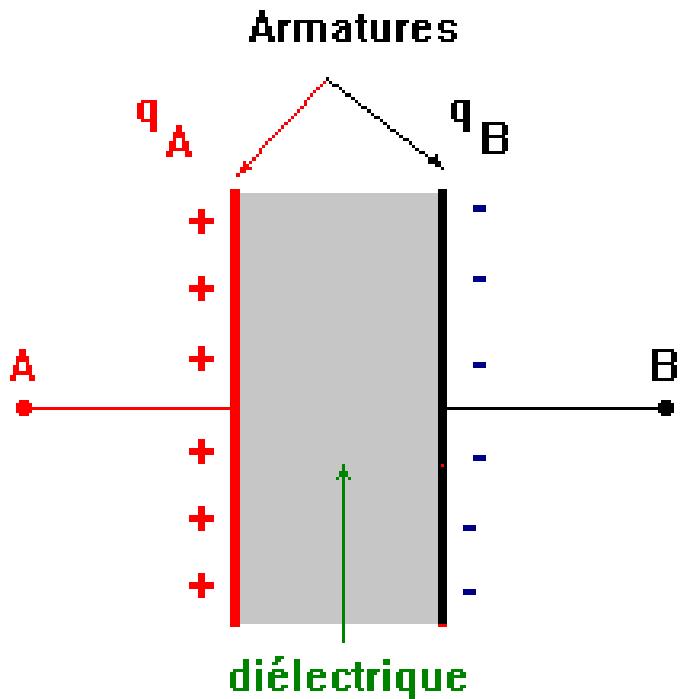
## Condensateurs

- Composants électroniques constitués de deux surfaces conductrices en vis-à-vis et séparées par un matériau diélectrique.
- Un apport de charge sur une armature (courant) entraîne l'apparition d'une tension.

$$\Delta Q = C \times \Delta V$$

$$I = C \times \frac{dV}{dt}$$

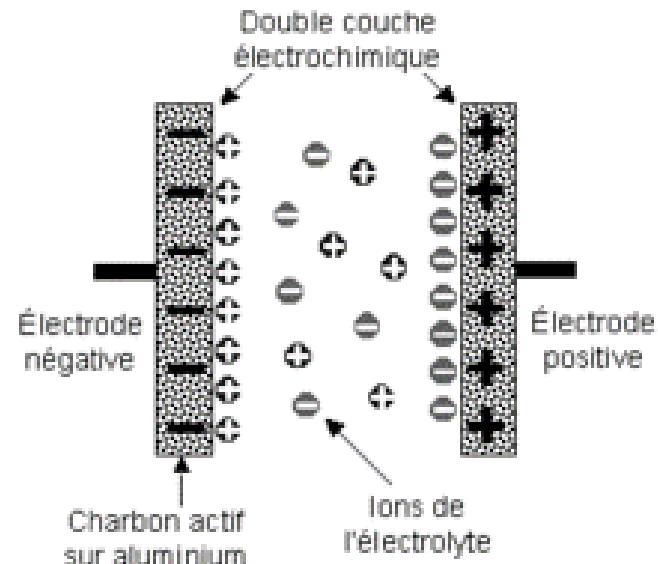
- Utilisations :
  - Lissage/stabilisation de tension
  - Stockage d'énergie électrique
  - Filtrage
  - Montages électroniques
  - Etc.
- Capacité  $C$ 
  - proportionnelle aux surfaces en vis-à-vis
  - Inversement proportionnelle à leur écartement





## Supercondensateurs

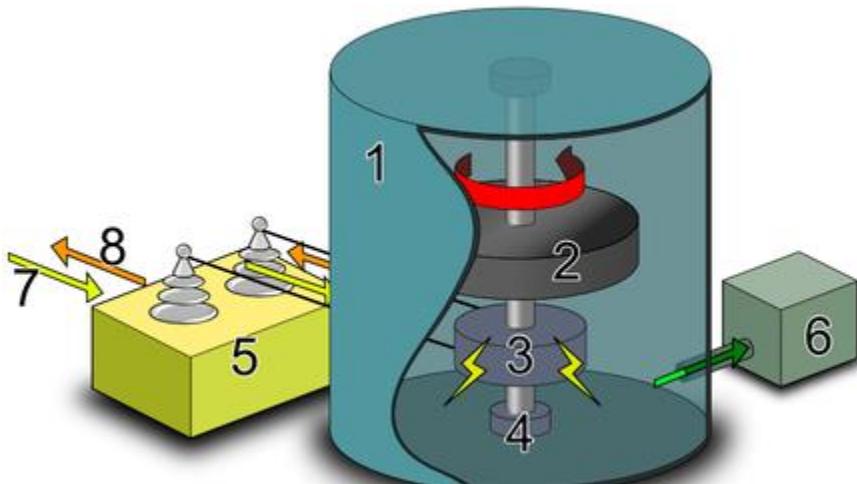
- Charbons actifs poreux : très grandes surfaces
- Effet capacitif entre des ions et des électrons extrêmement proches
- Capacité de plusieurs farads
- Densité d'énergie : 4-6 Wh/kg
- Densité de puissance : 1-5 kW/kg
- Utilisations :
  - Récupération d'énergie au freinage
  - Stabilisation du réseau électrique
  - [LIEN](#)





## Volants d'inertie

- Energie cinétique de rotation :  $\frac{1}{2}J\Omega^2$
  - Forte densité de puissance : plusieurs kW/kg
  - Densité d'énergie : 10 à 150 Wh/kg (*matériau*)
  - Temps de réponse de l'ordre de la seconde
- 
- Bon rendement grâce à l'utilisation sous vide
  - Encore amélioré par les paliers magnétiques



Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique





# Sources irréversibles

## Piles

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : sources d'énergie électrique*

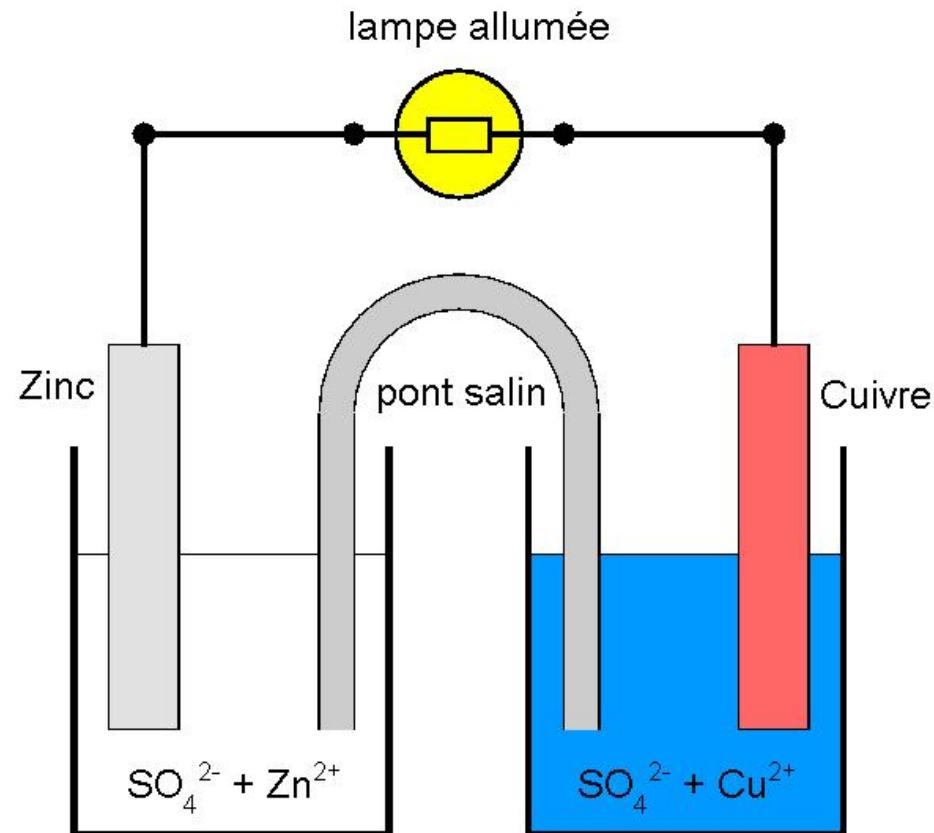


## Piles

- Système électrochimique à l'instar des accumulateurs
- Réaction non réversible : pas de recharge possible

## Piles salines

- Zinc-Carbone : 1,5 V (40 Wh/kg)
- Zinc-Cuivre : 1,1 V





## Piles alcalines

- Electrolyte basique ( $\text{pH} > 7$ )
- Zinc-Dioxyde de manganèse
  - Environ 1,5V / éléments
  - Densité d'énergie : 55 Wh/kg
  - « pile alcaline » de nos maisons
  - Souvent en format cylindrique
- Lithium-Dioxyde de manganèse
  - Environ 3V / éléments
  - Densité d'énergie  $\leq 400\text{Wh/kg}$
  - Très faible autodécharge : 1% / an à 25 °C
  - Souvent sous forme de piles boutons



# Sources irréversibles

## Piles à combustibles

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

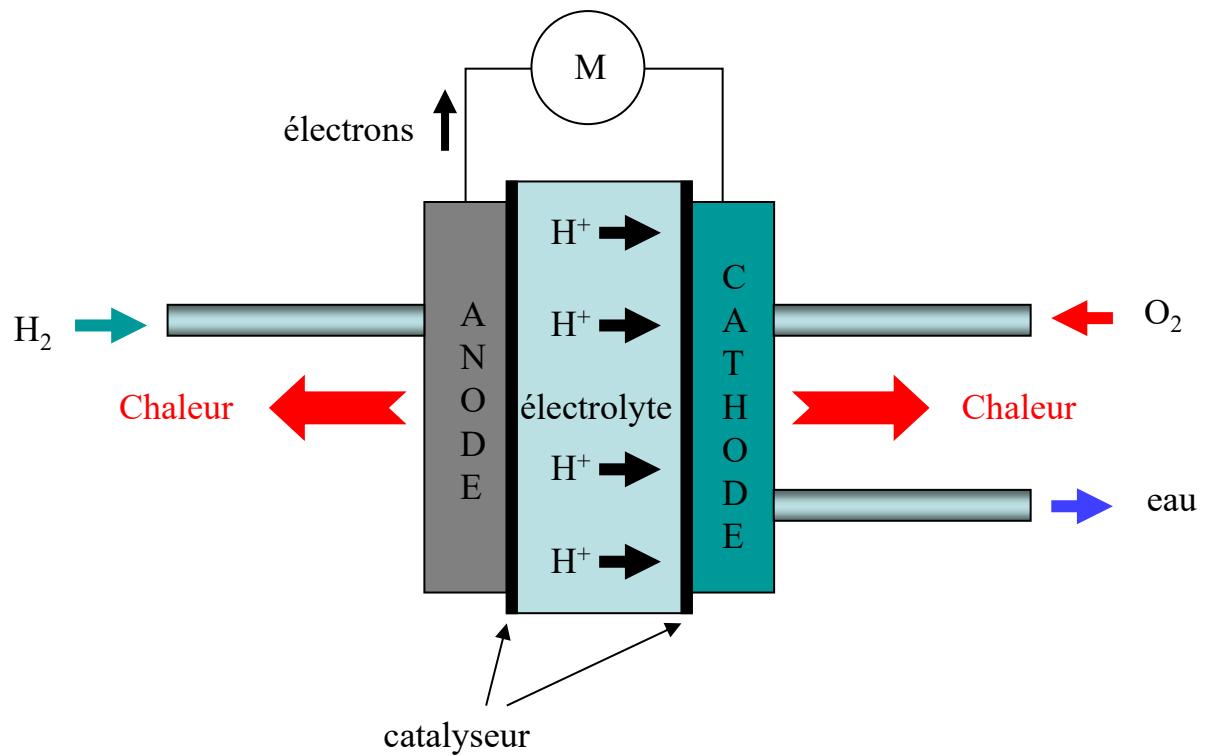
[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : sources d'énergie électrique*



## Pile à combustible

- Hydrogène + oxygène => électricité + eau
- Nécessite un réservoir et une pompe
- Rapide à « recharger », mais encombrant
- 0,7 à 0,8V / éléments
- Faible dynamique



Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



# Sources irréversibles

## Panneaux photovoltaïques

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

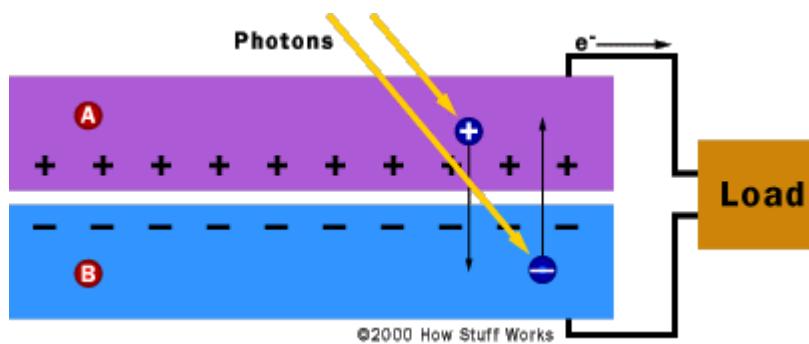
[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : sources d'énergie électrique*



## Panneaux photovoltaïques (PV)

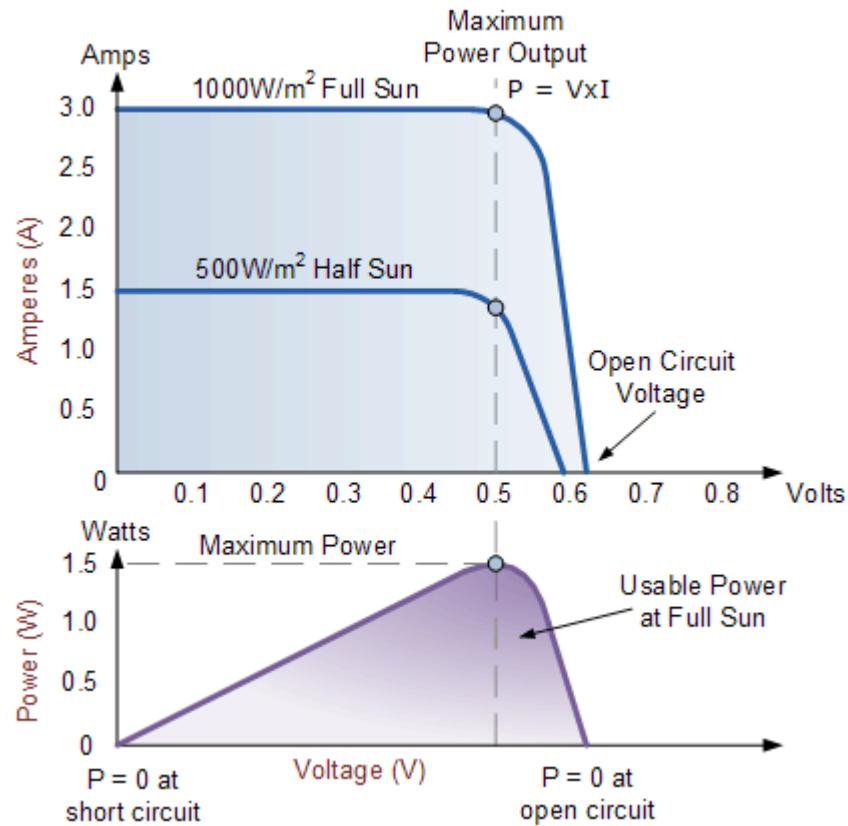
- Conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique
- Chaque photon suffisamment énergétique transmet son énergie à un électron, le mettant en mouvement en laissant un « trou » derrière lui.
- Par conception, le champ électrique interne entraîne les charges.





## Panneaux photovoltaïques (PV)

- Caractéristique courant-tension spécifique
- $U = f(I, \text{Ensoleillement}, \text{Température})$
- Existence d'un *Maximum Power Point* (MPP)
- $P_{MPP} = f(\text{Ensoleillement}, \text{Température})$
- Tension faible : 0,5 V / éléments
- Avec CEP :  $P_{PV} \in [0; P_{MPP}]$
- Sensible à l'inclinaison / soleil
- Performances dégradées à chaud
- $\frac{\eta_{elec}}{\eta_{soleil}} \approx 15\% \text{ (produits grand public)}$





# Utilisation de plusieurs sources

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

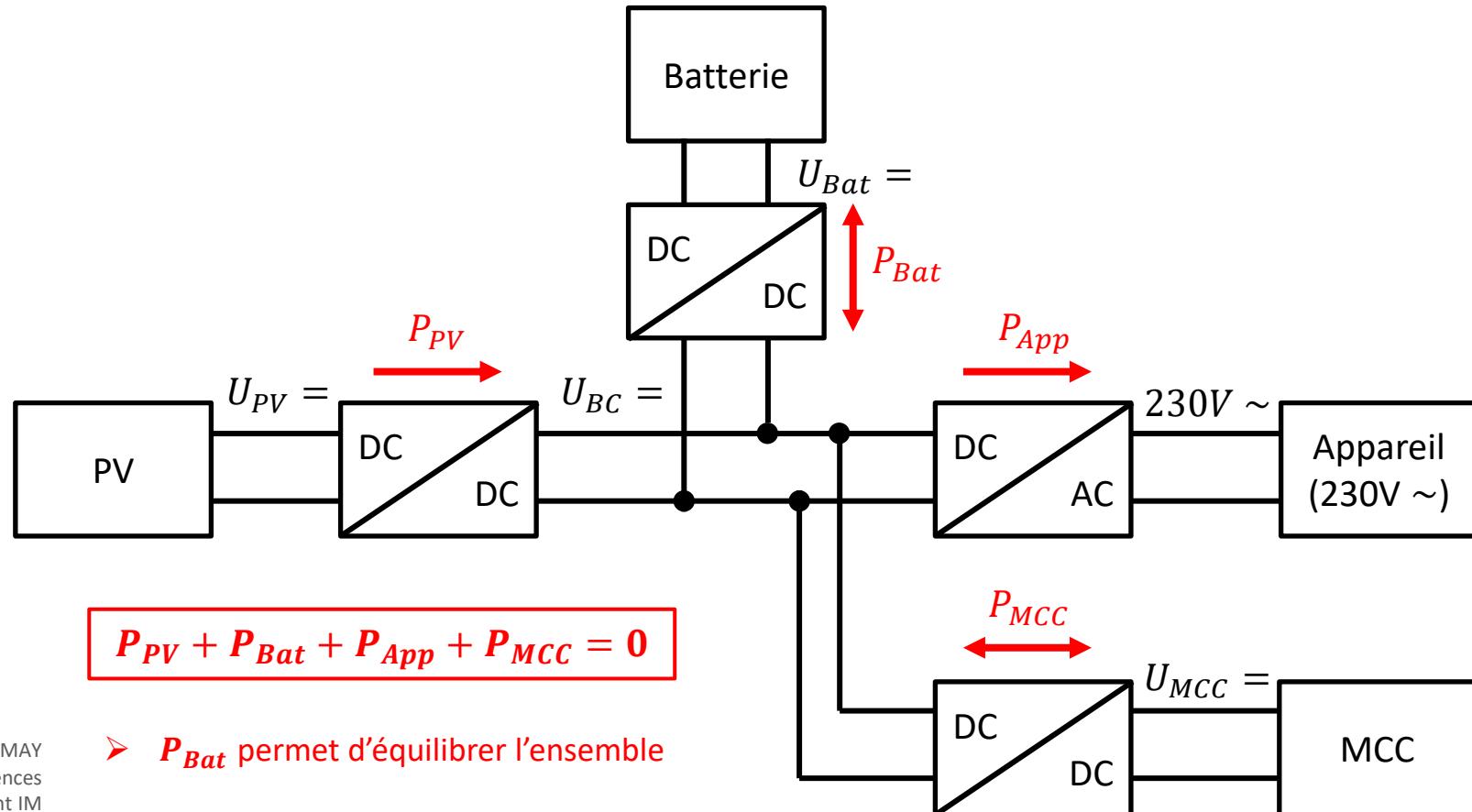
[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : sources d'énergie électrique*



## Utilisation de plusieurs sources

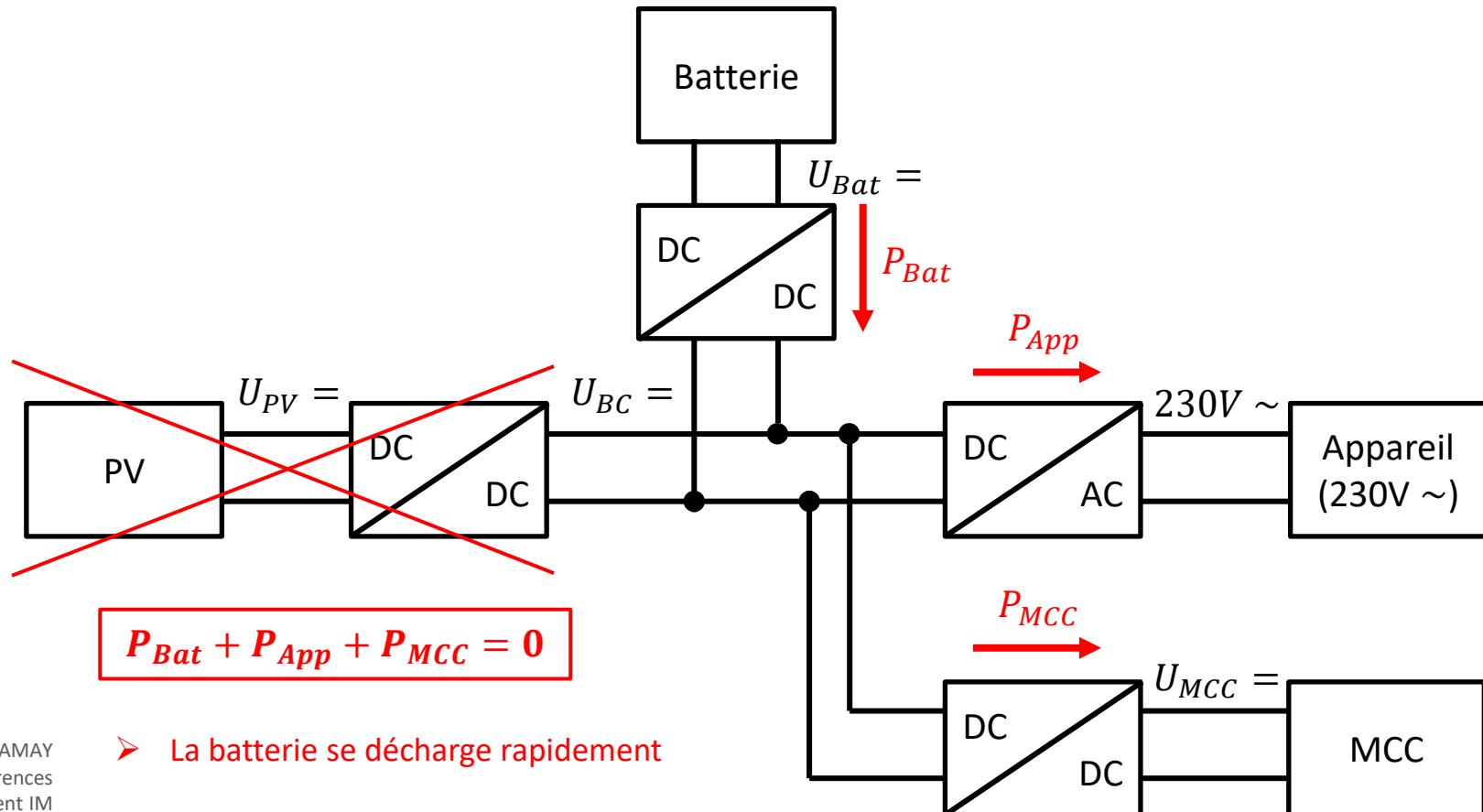
- Souvent : passage par un « bus continu » sur lequel on branche tous les composants d'un système





## Utilisation de plusieurs sources

- Cas d'un manque de soleil
- MCC en mode moteur

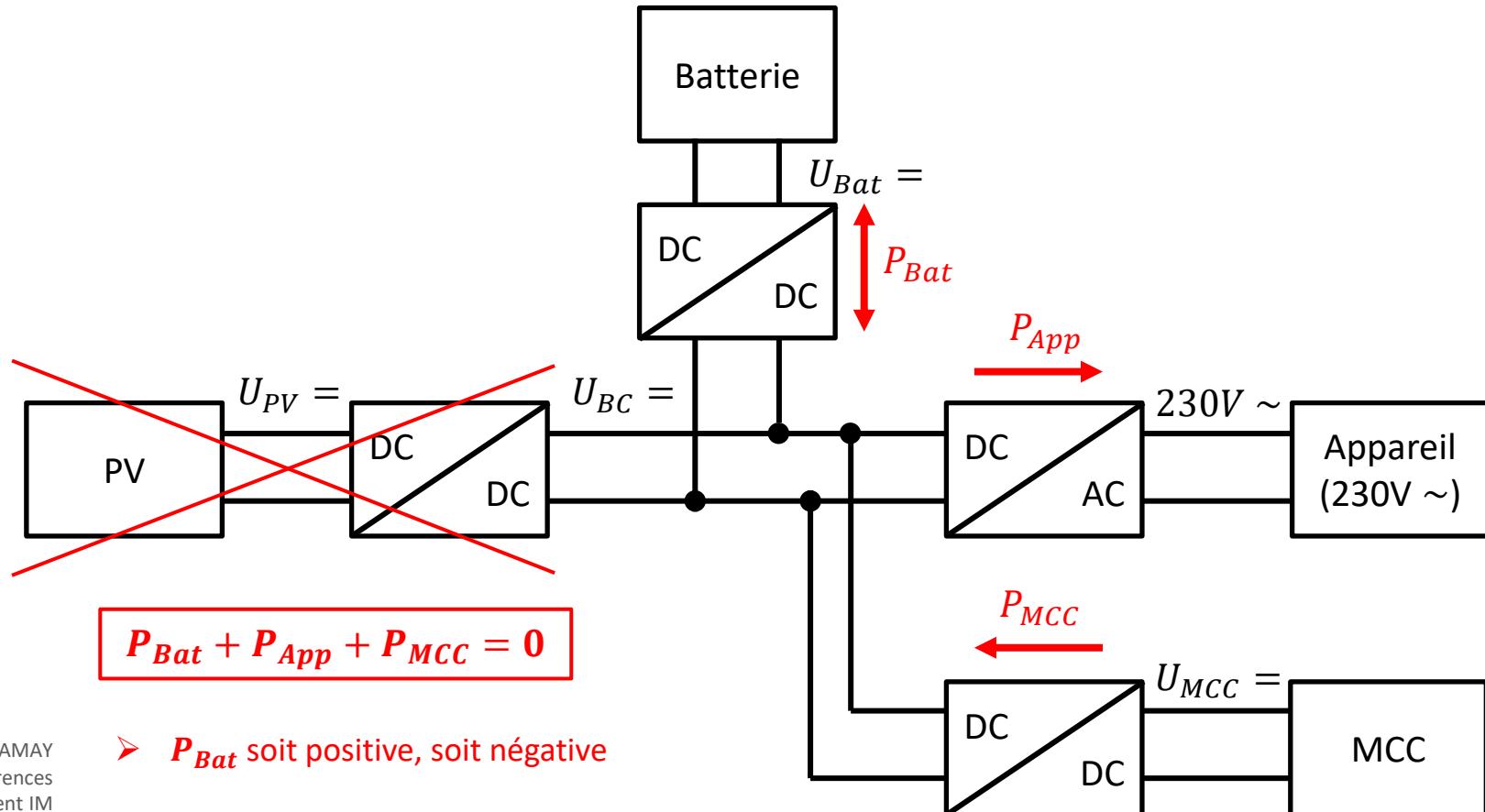


Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM



## Utilisation de plusieurs sources

- Cas d'un manque de soleil
- MCC en mode générateur





## Utilisation de plusieurs sources

- Cas d'un soleil fort
- Pas de consommation

