

Les sources d'énergie électrique





Introduction

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



Types de sources

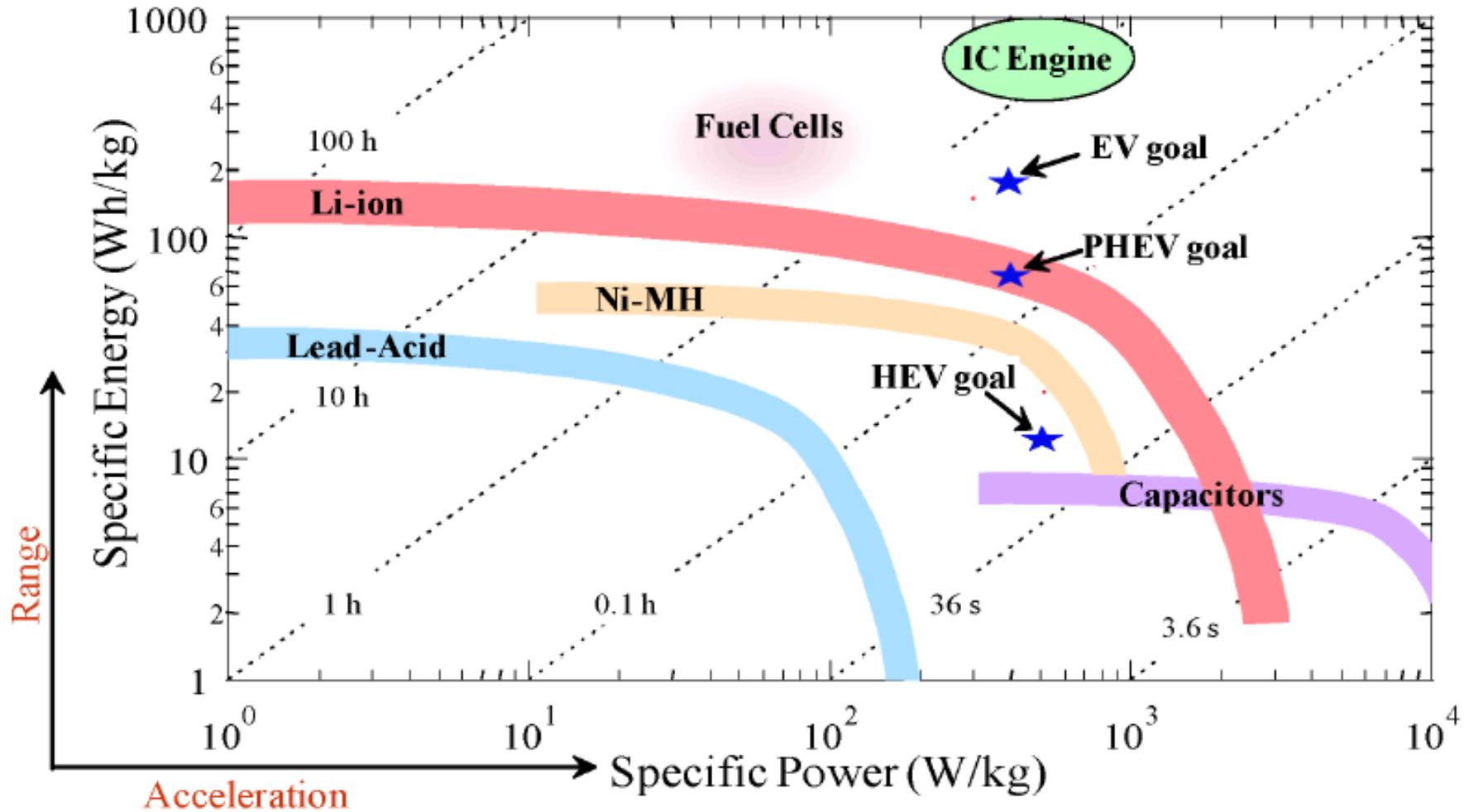
- Réversibles ou irréversibles
- Tension et courant : **continus** ou alternatifs
- Typées énergie et/ou puissance
- Stationnaires ou embarquées

Critères de dimensionnement

- Energie disponible, puissance disponible
- 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 »

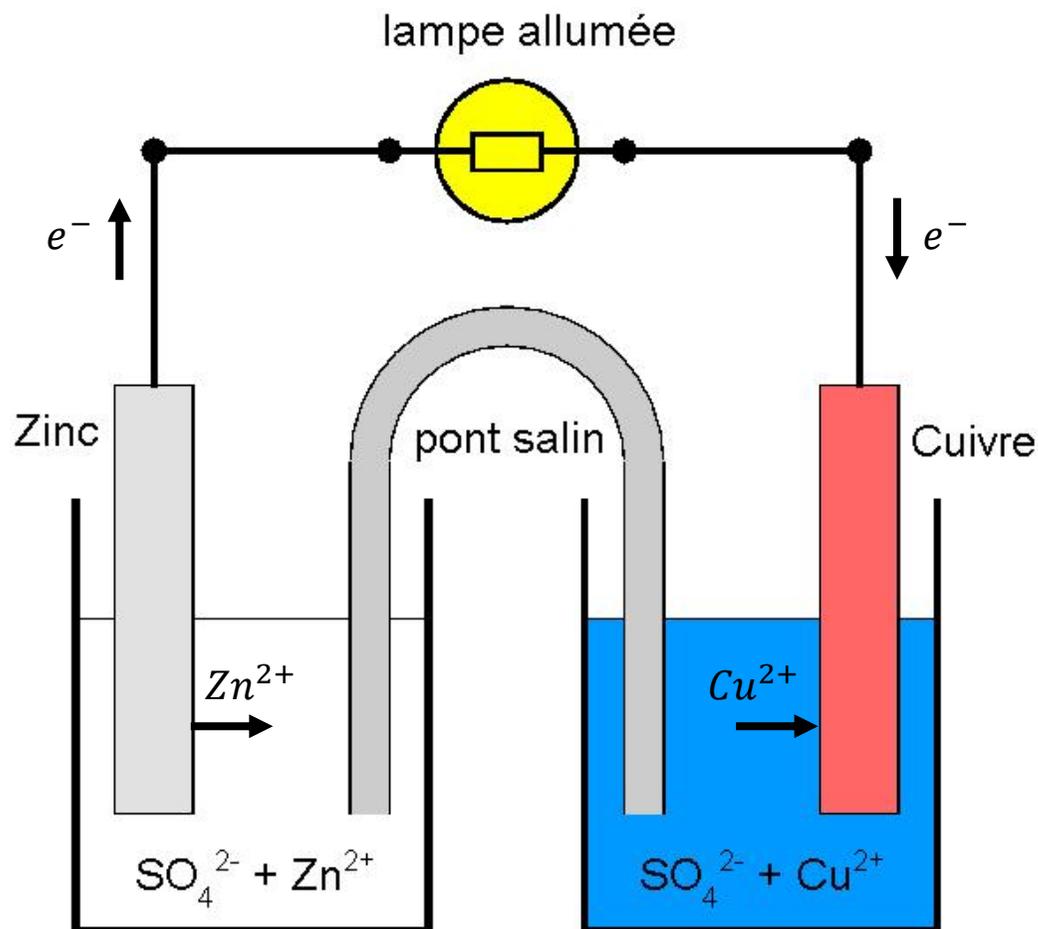
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



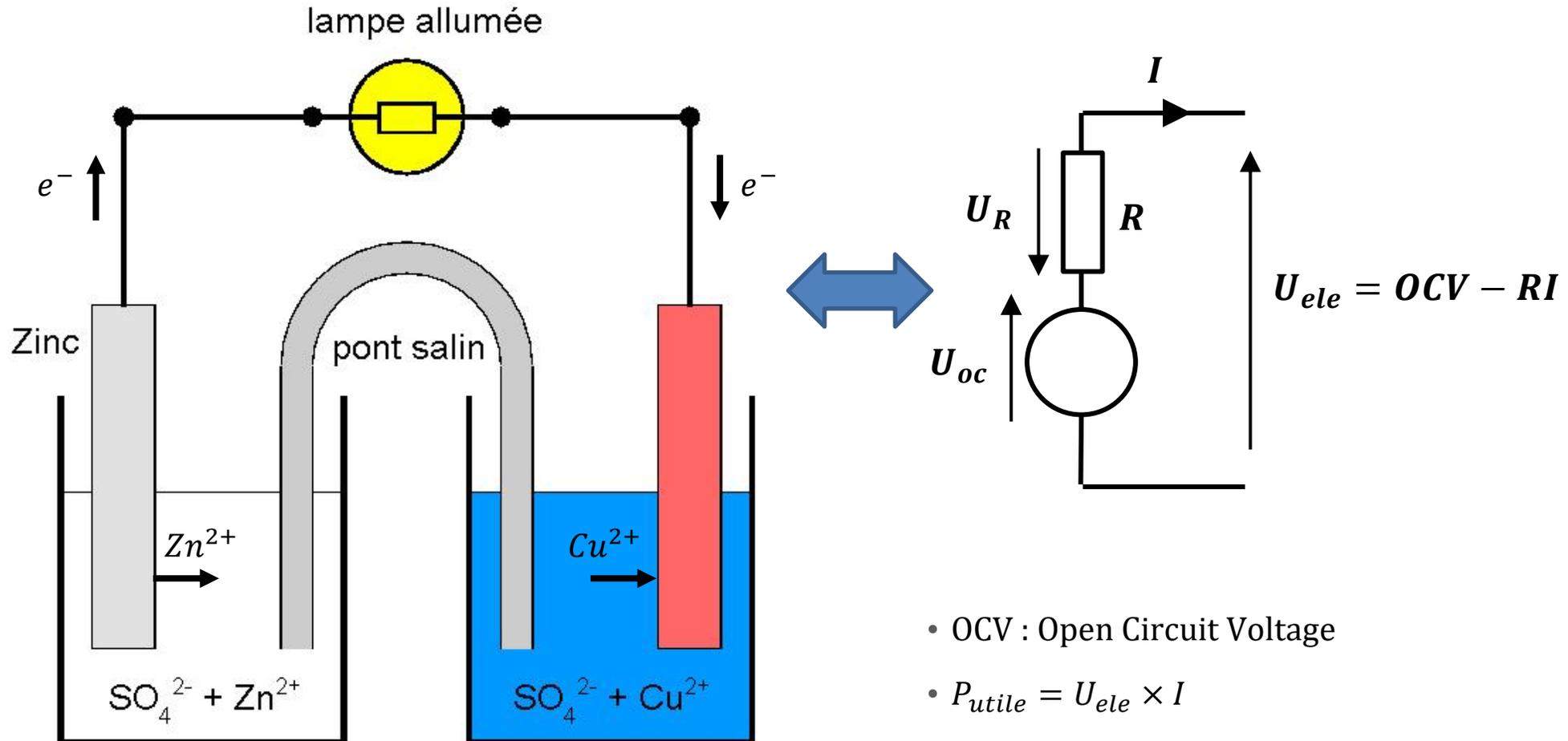
Cellule électrochimique : principe de fonctionnement



- 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



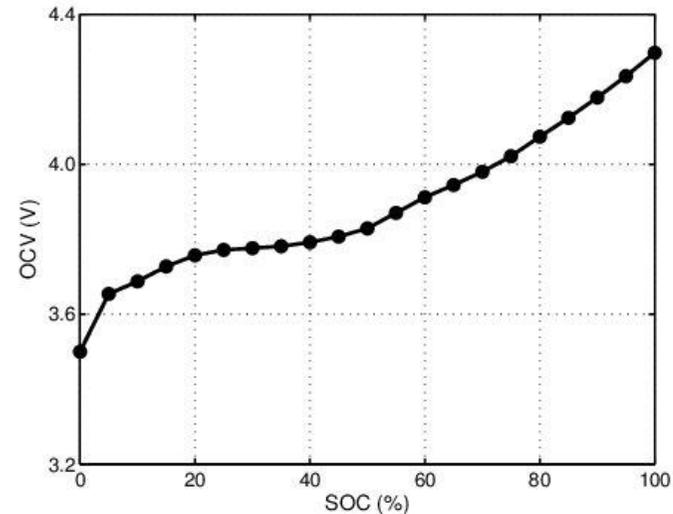
- OCV : Open Circuit Voltage
- $P_{utile} = U_{ele} \times I$
- $pertes = R \times I^2$



Non-linéarités

En réalité, l'OCV dépend de :

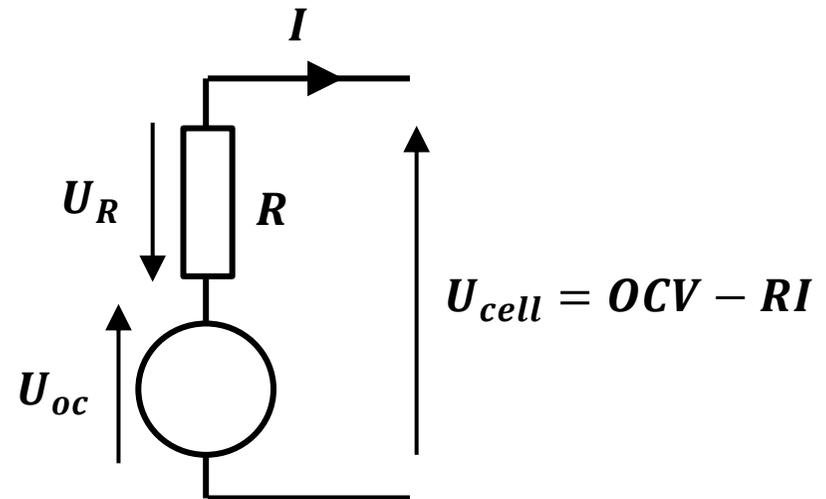
- la chimie utilisée ;
- la conception de la cellule ;
- l'état de charge (SoC : state of charge) ;
- l'état de santé.



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

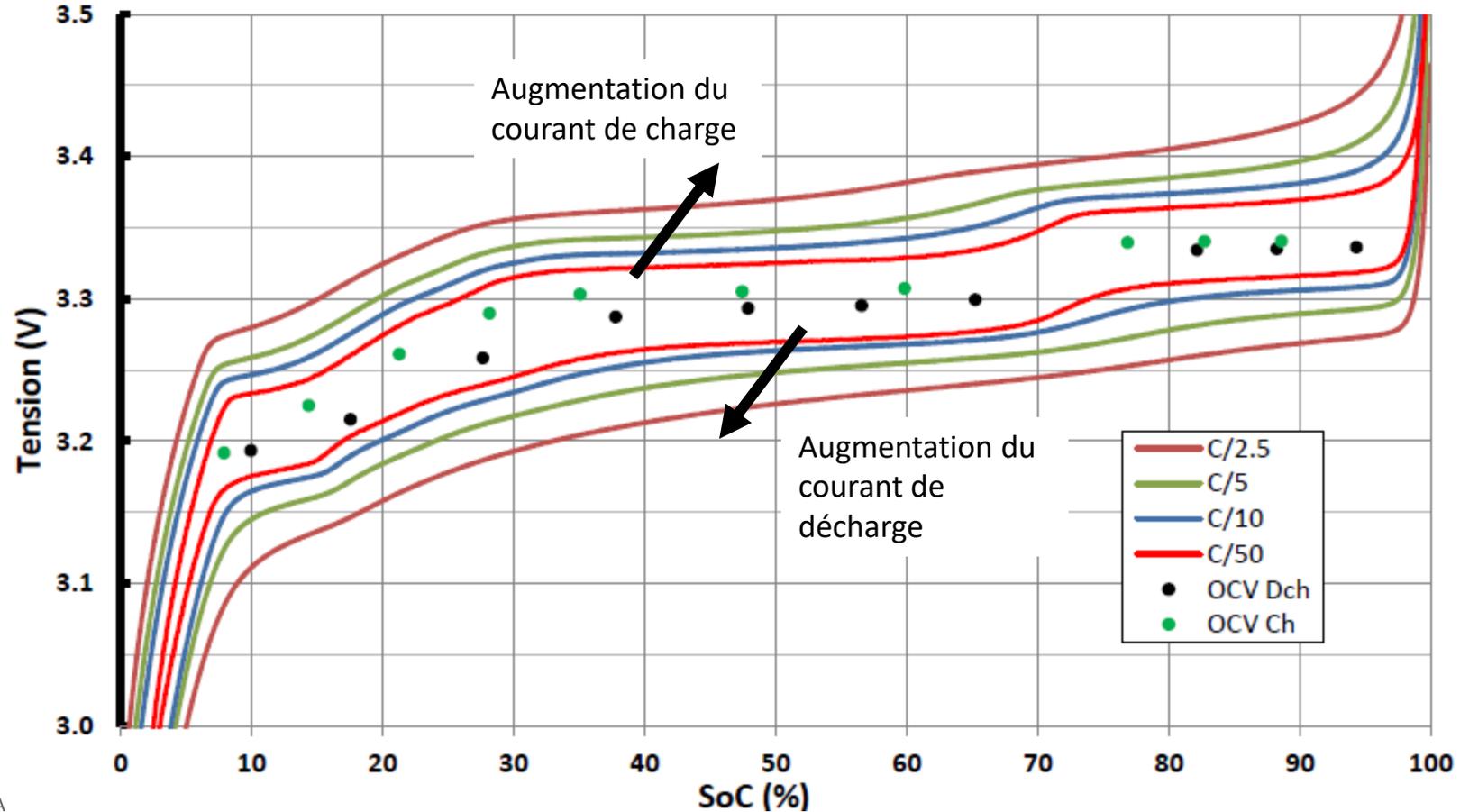
En réalité, la résistance interne dépend de :

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





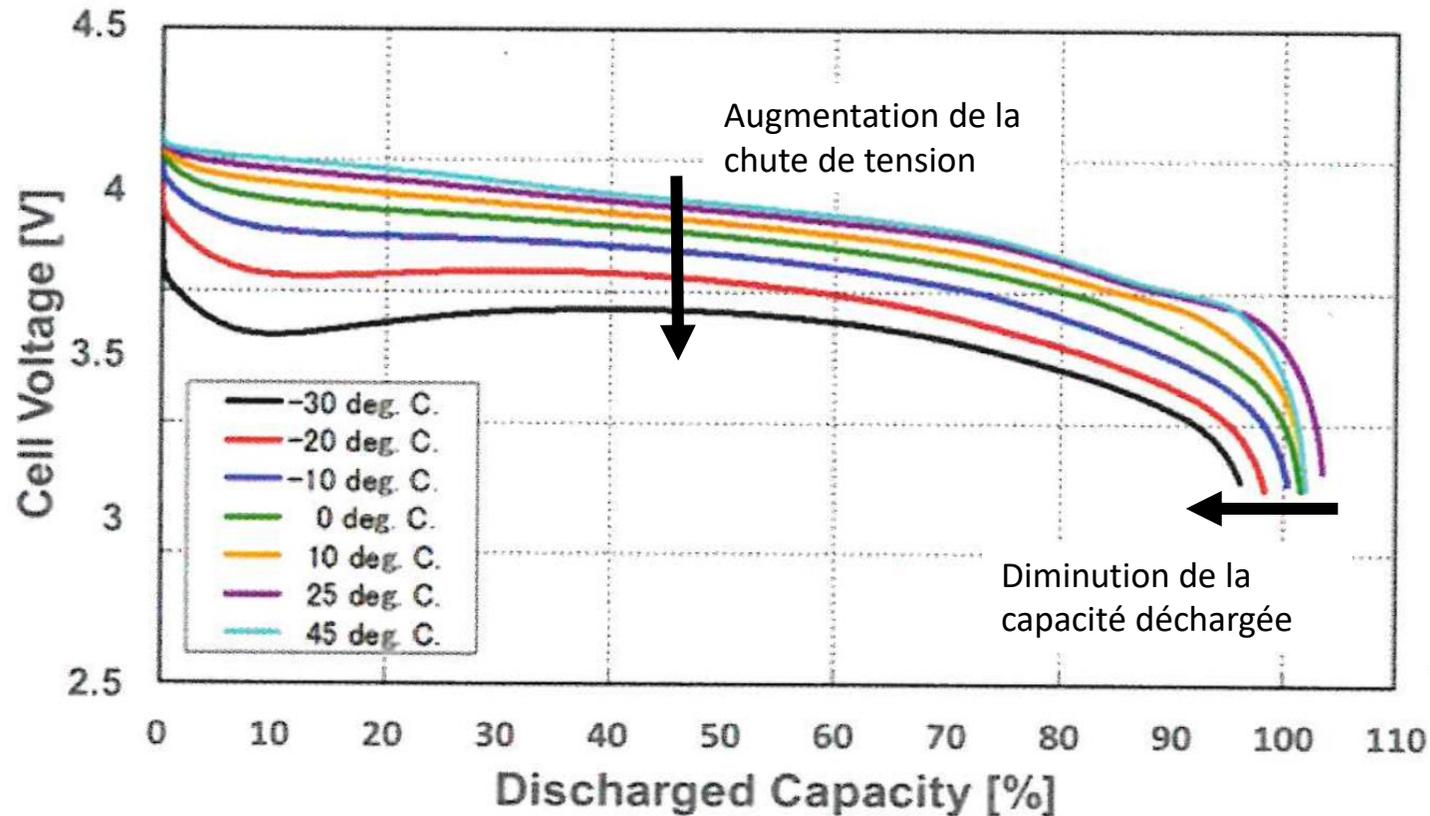
Influence du courant sur la tension





Dépendance en température

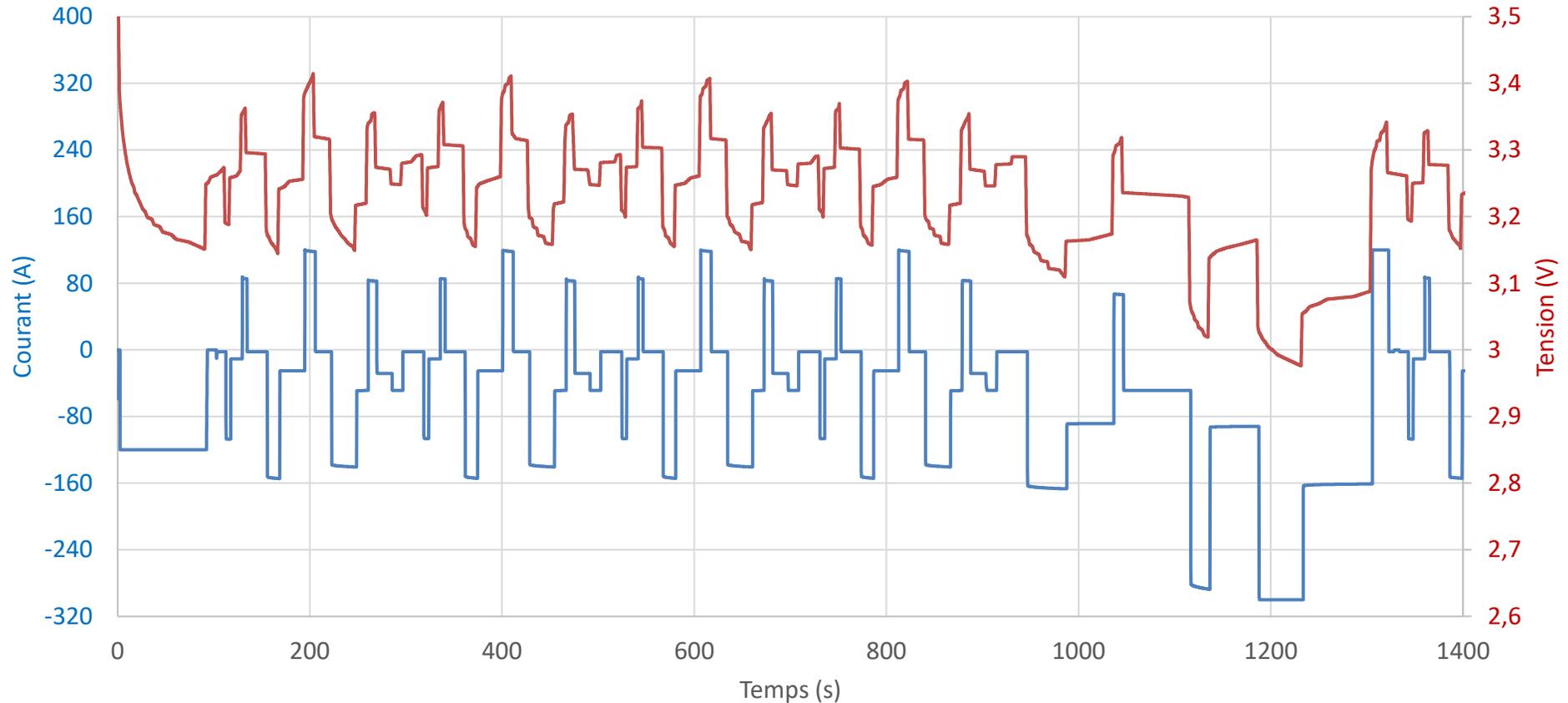
Discharge Performance @1CA (LIM50H)





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)**

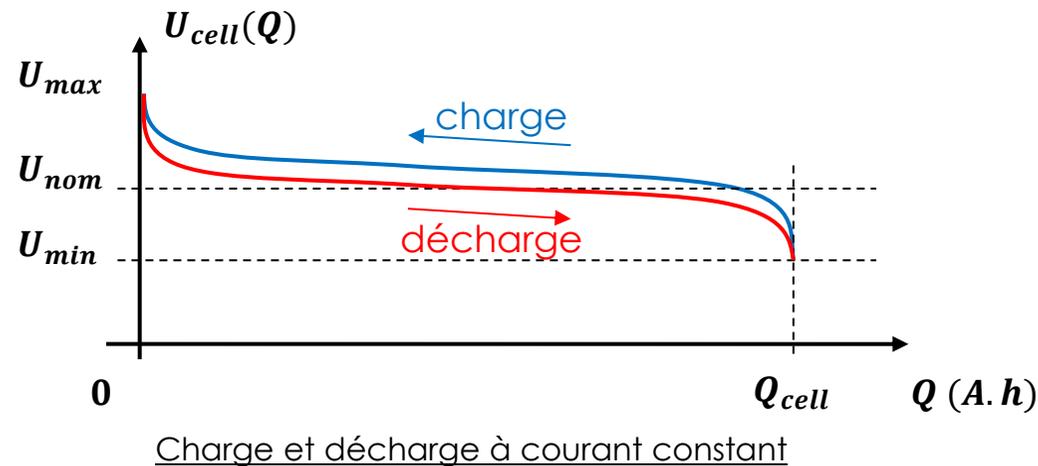
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



Modèle simplifié et caractéristiques principales

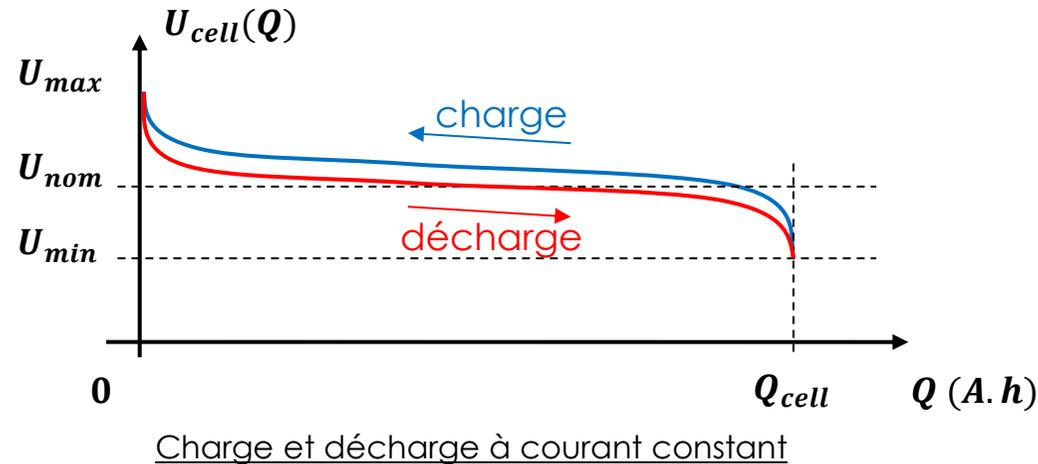


- Tension nominale U_{nom} = tension « typique » en décharge
- Courant nominal I_{nom} = courant permanent maximal (charge \neq décharge)
- Courant maximal I_{max} = courant maximal (*pour une durée courte*)
- Capacité Q_{cell} (A.h) : quantité de charges électriques stockées

!/ Tension plus élevée en charge qu'en décharge !/



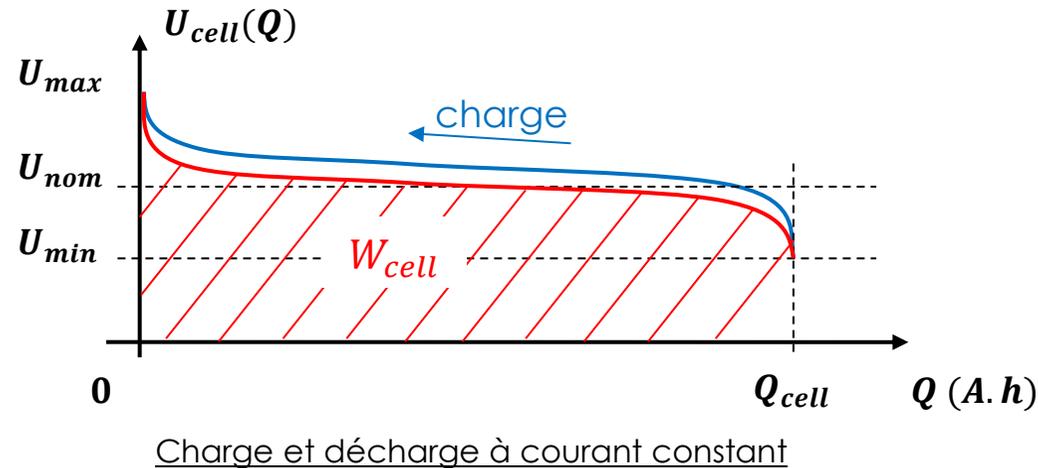
Régime de courant



- « 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



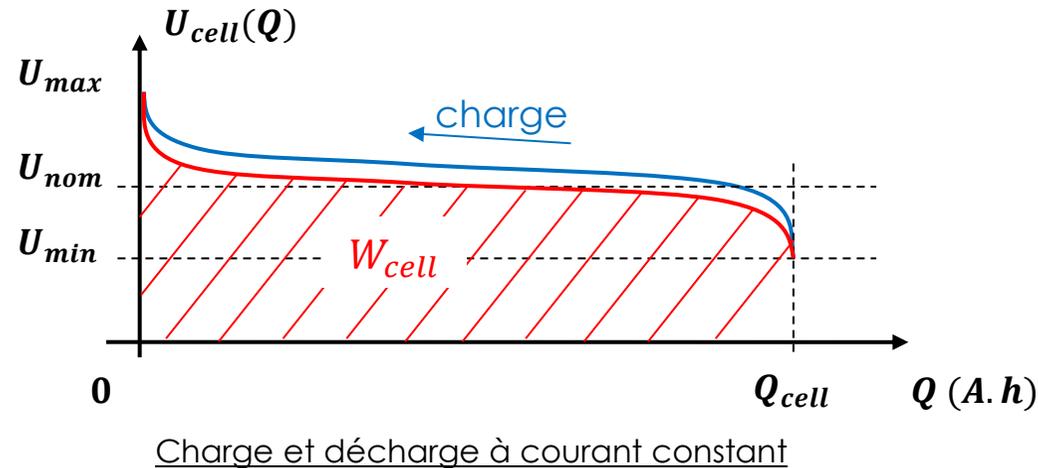
- Puissance instantanée max : $p_{max} \approx u_{nom} \times i_{max}$ (souvent en décharge)
En réalité, celle-ci dépend du SoC, de la température, de l'état de santé, du temps...
- Travail W_{cell} disponible en décharge :

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

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



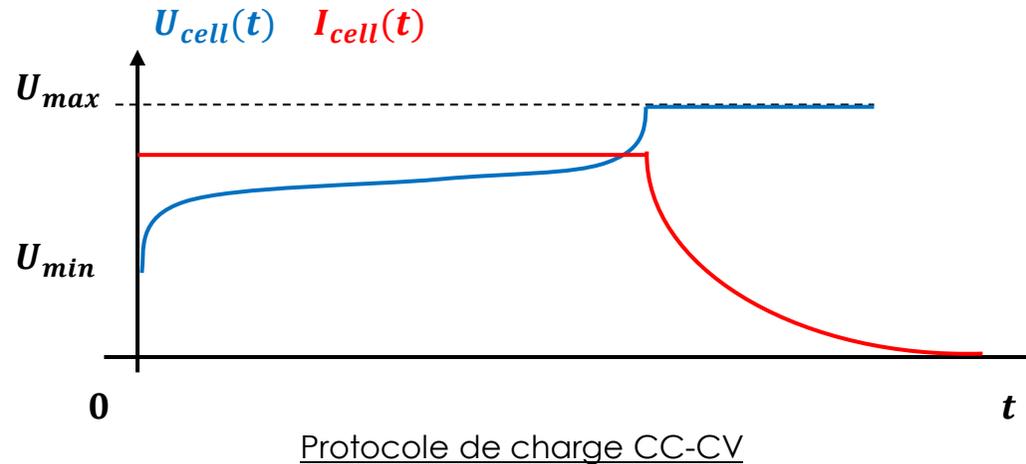
Rendement énergétique



- 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 : $r_f = Q_{Dch}/Q_{Ch}$ (≈ 1 pour le Li-ion)



Protocole de charge classique



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

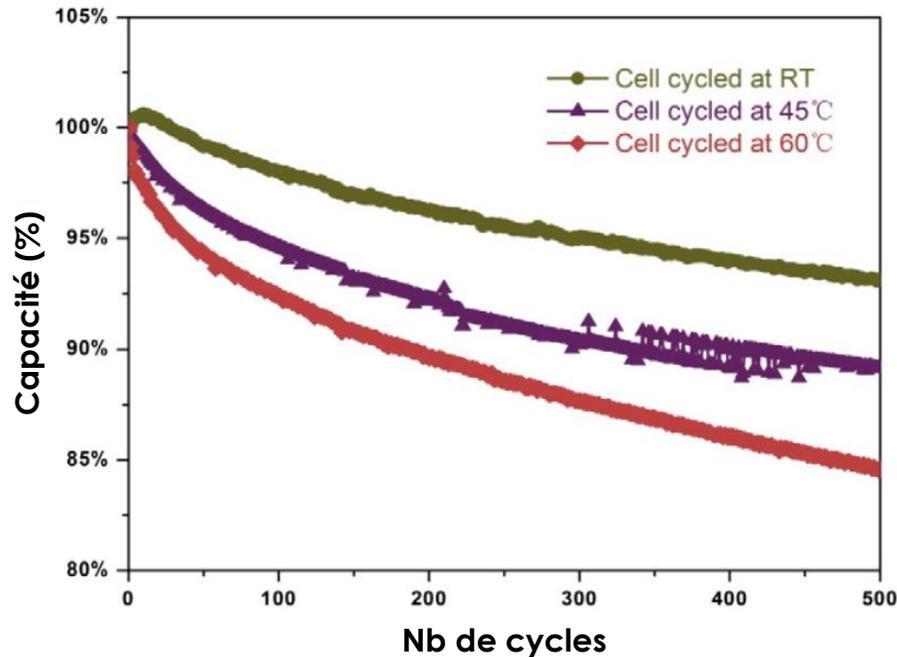
- Quand $U_{cell} = U_{max}$ alors débute une seconde phase

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

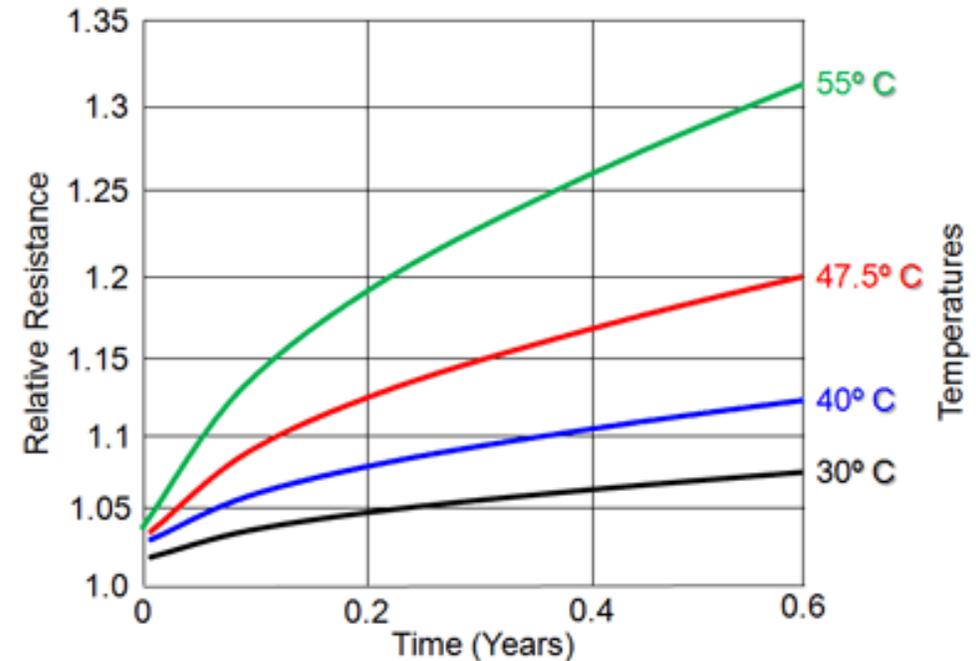
- Ceci permet de remplir au maximum la cellule
- **Recherches dans notre équipe : charge « au plus rapide »**



Viellissement « normal »



Réduction de capacité



Augmentation de résistance interne

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



Vieillessement « 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	Alcaline Manganèse	Argent	Zinc Air	Plomb	Nickel Cadmium	Nickel Métal hydrure	Lithium-ion	Na-ion – Li-air – LiC – NiH ₂ ...
Tension à vide (V)	1,5	1,5	1,6	1,45	2	1,3	1,2	3,3 à 4	En développe- ment 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 ₂ + C	Zn	Zn	O ₂	Pb O ₂	Ni O OH	Ni	LCO – NMC – LMO – LFP - NCA	
Électrode négative	Zn	Mn O ₂	Ag O ₂	Zn	Pb	Cd	hydrure métallique	Lithium métal – Graphite - LTO	
Électrolyte	NH ₄ Cl Zn Cl eau	KOH + eau	KOH + eau	KOH + eau	H ₂ SO ₄ + eau	KOH + eau		LiPF ₆ , 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	



Sources réversibles

Mise en œuvre

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : sources d'énergie électrique

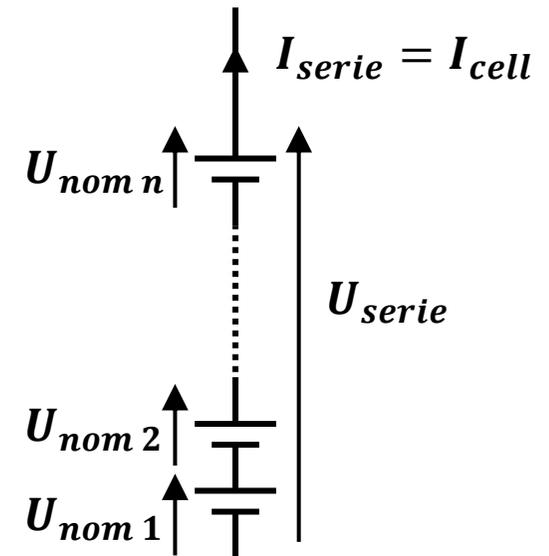


Augmentation de la tension - Association en série

- 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 $p_{serie,max} \approx (n \times u_{nom}) \times i_{max,cell}$



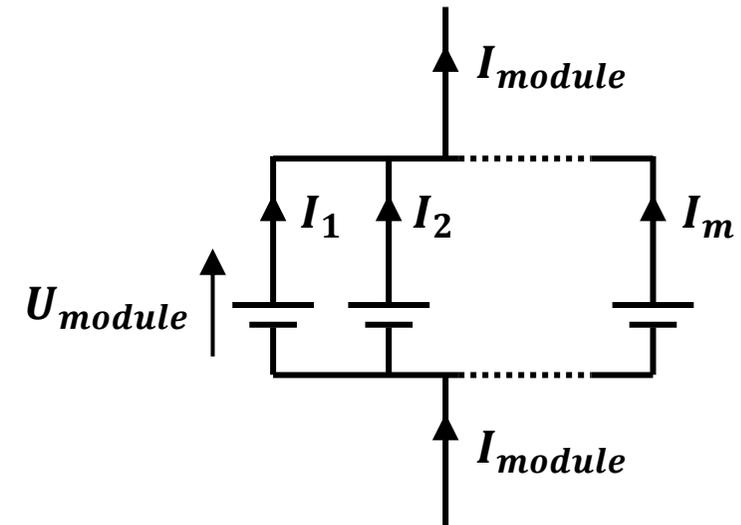


Augmentation de courant/capacité - Association en parallèle

- 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 $p_{module,max} \approx u_{nom} \times (m \times i_{max,cell})$



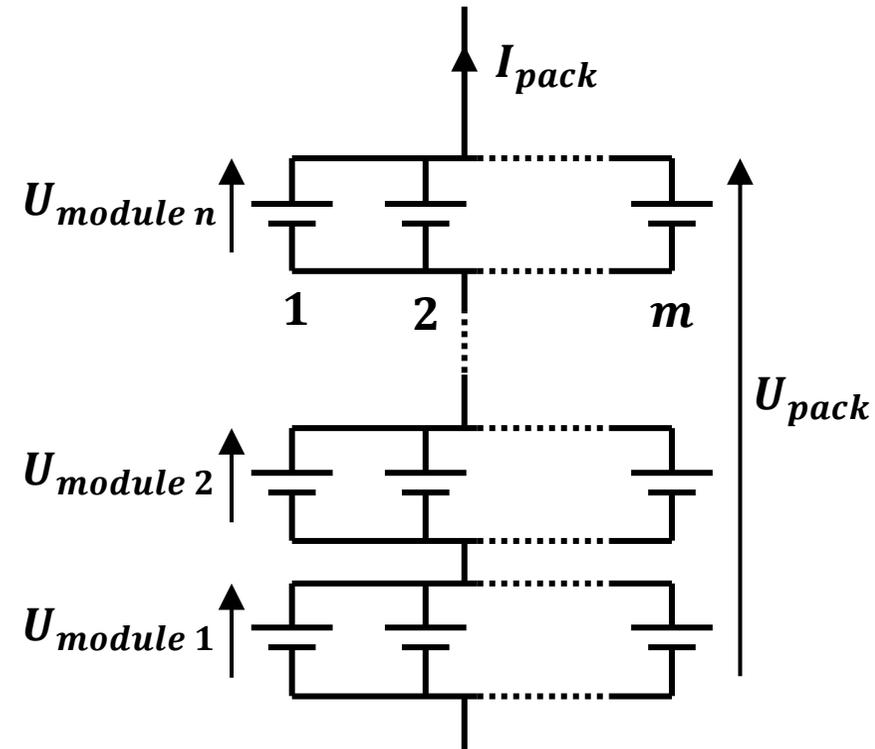


Association mixte : assemblage en série et en parallèle

- L'ensemble est appelé « pack batterie »
- Il permet d'atteindre les performances voulues

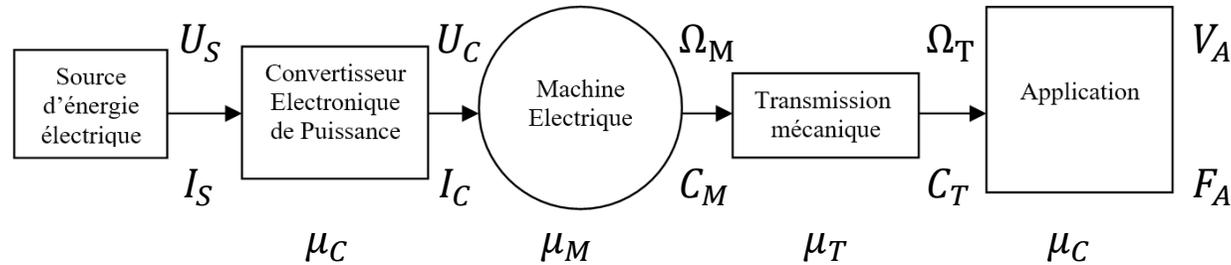
- Tension : $U_{pack} = n \times U_{cell}$
- Courant : $I_{pack} = m \times I_{cell}$
- Capacité : $Q_{pack} = m \times Q_{cell}$
- Énergie : $E_{pack} = n \times m \times E_{cell}$
- Puissance max :

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





Pack batterie : vérification du cahier des charges



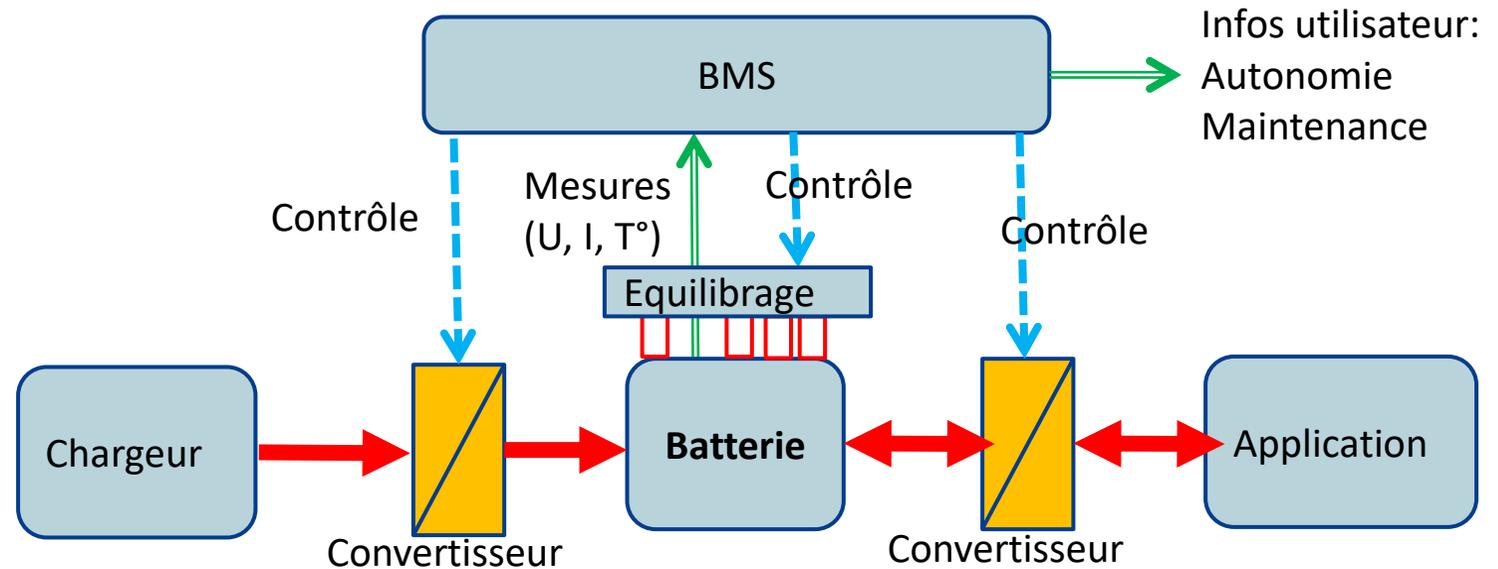
Critères à vérifier

- 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 /!\)
- 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

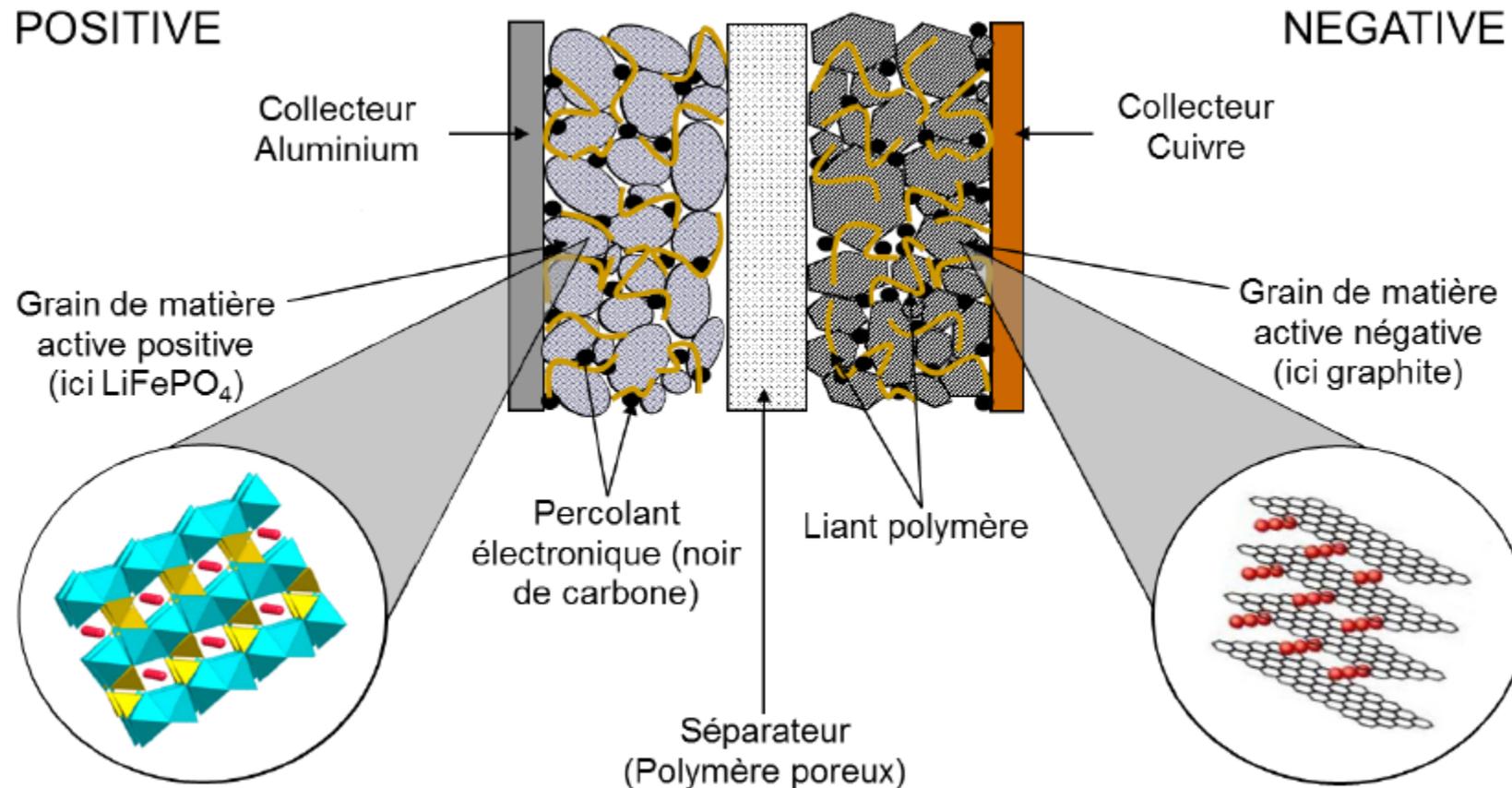
Cas du lithium-ion

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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



Constitution d'une batterie lithium-ion



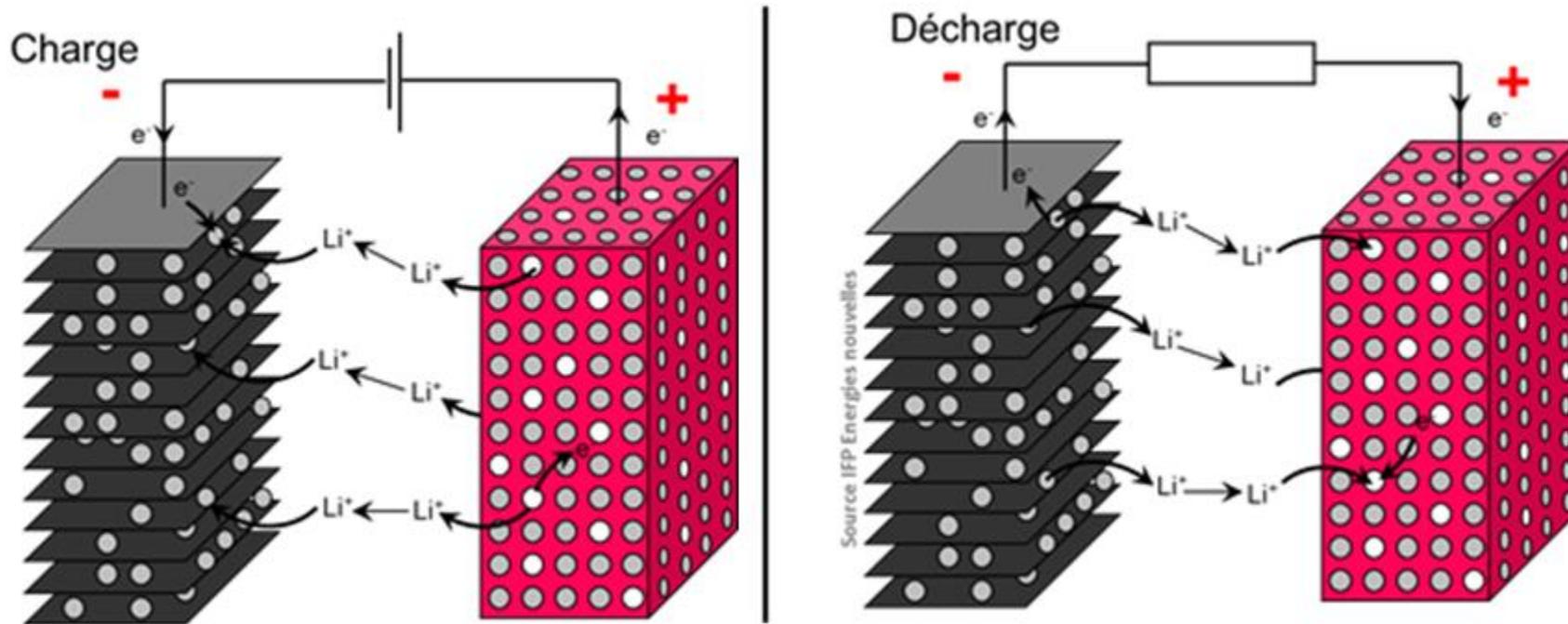
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Source : IFPEN



Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion

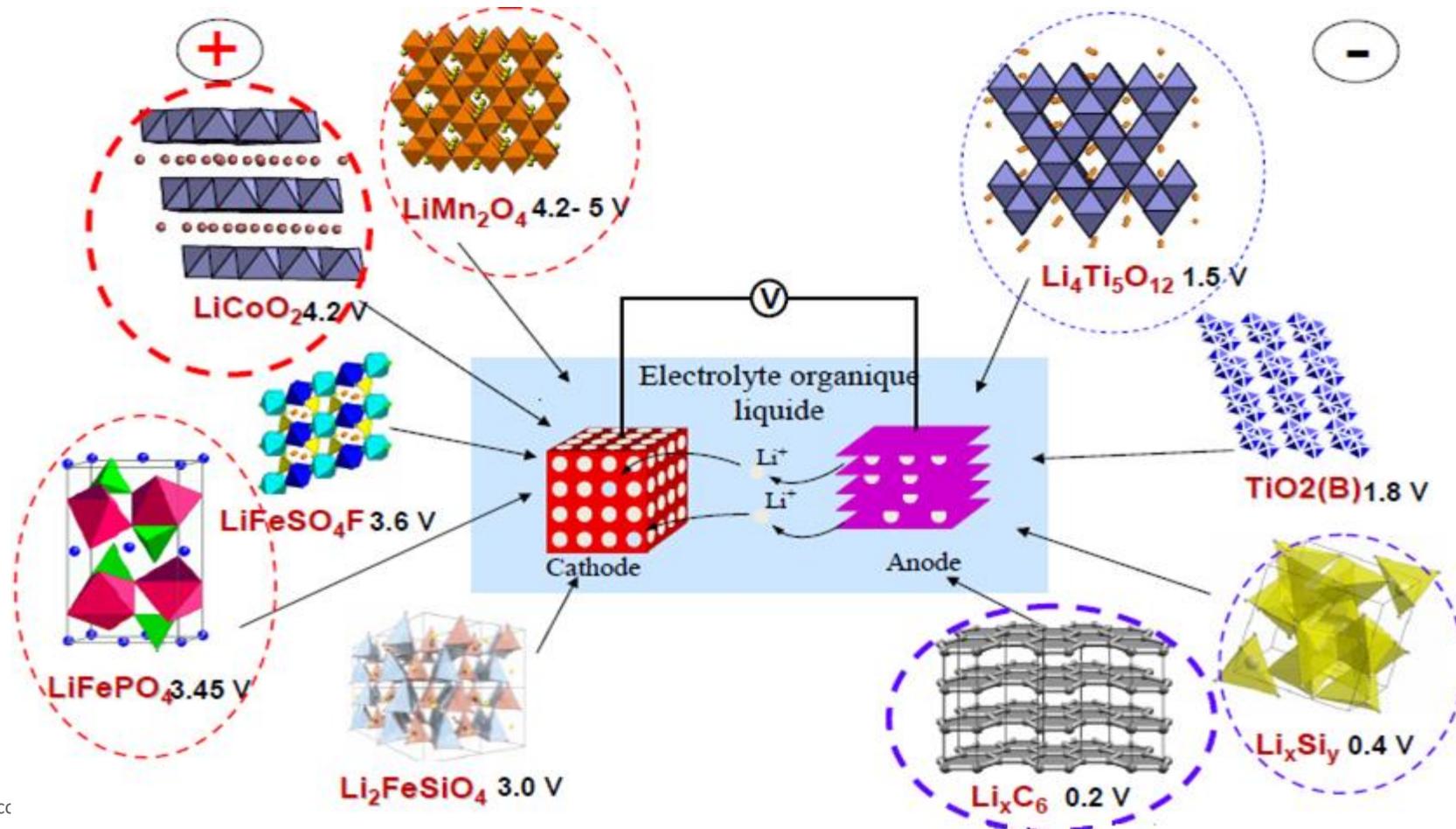


Insertion
des ions Li^+ dans les plans de carbone

déinsertion



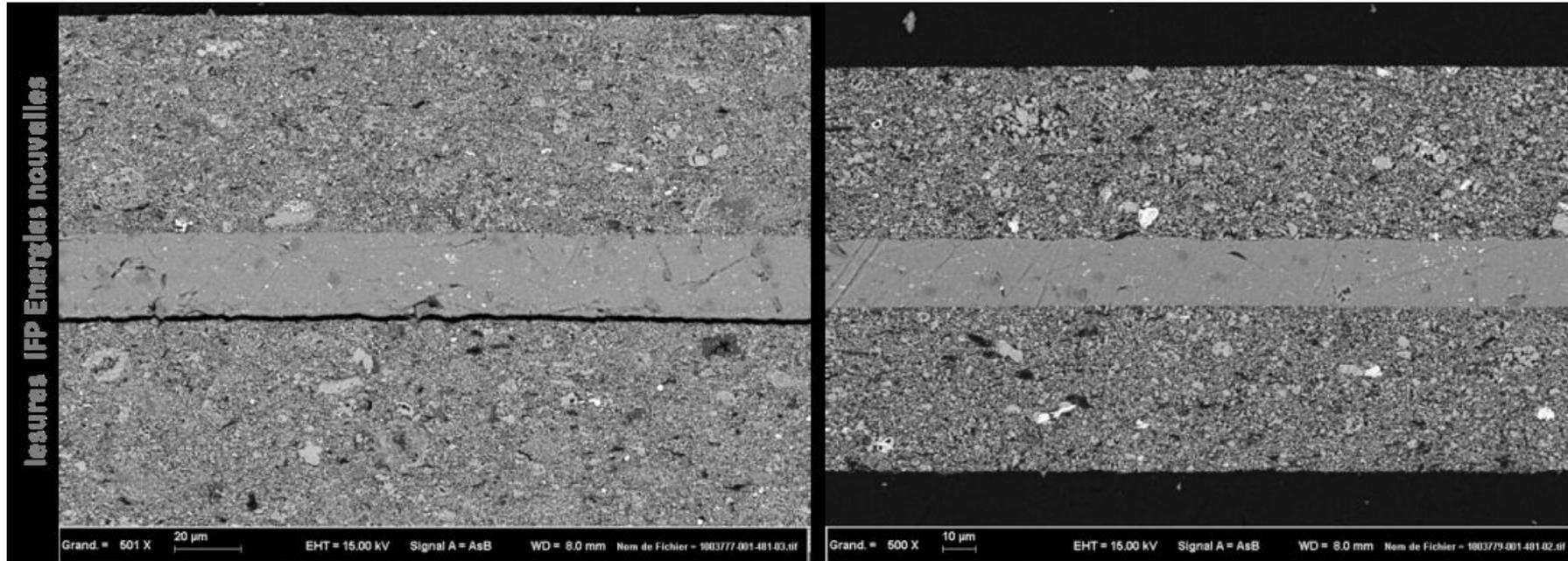
Principales combinaisons de matériaux



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)

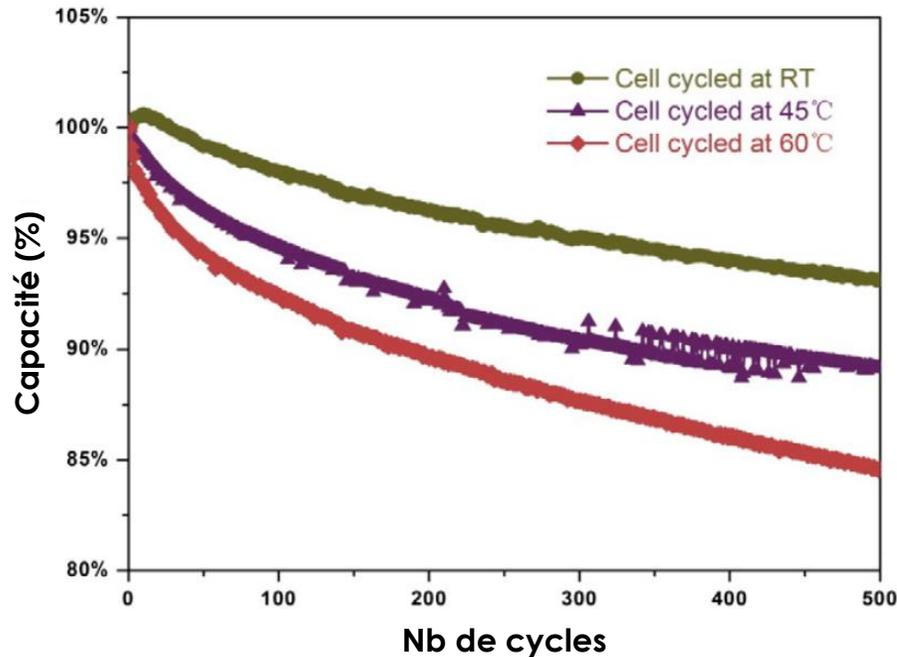
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : sources d'énergie électrique

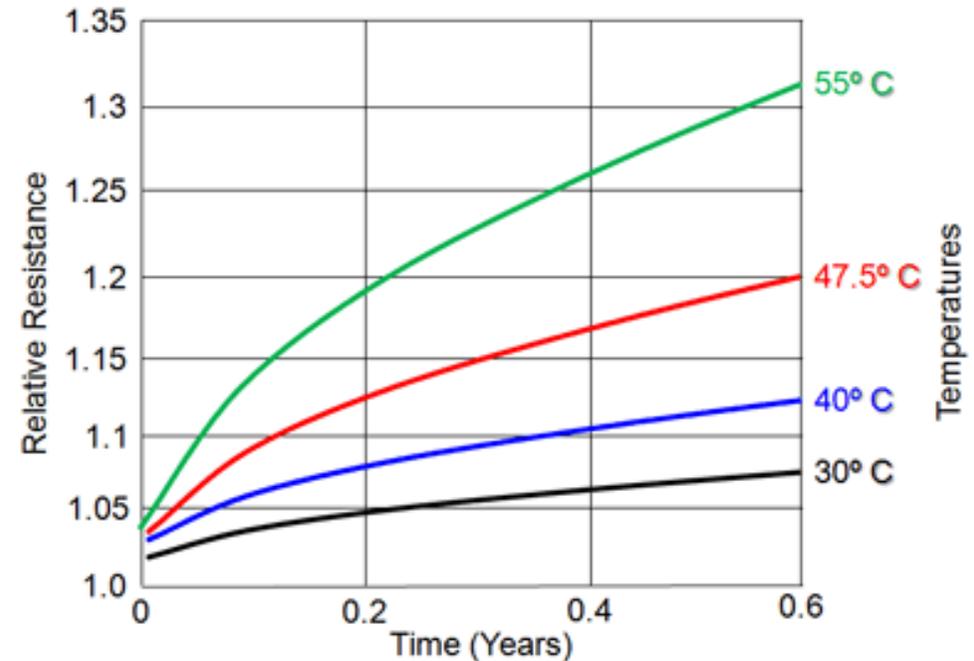


Viellissement « normal » (rappels)



Réduction de capacité

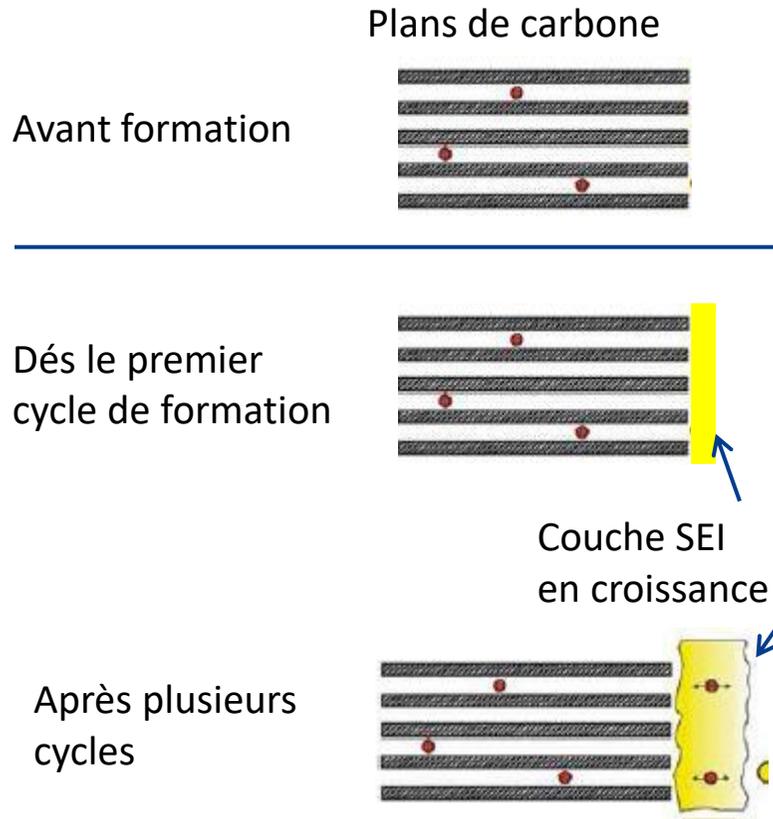
- Perte d'énergie et perte de puissance
- Phénomène favorisé à haute température et à haut état de charge
- Une des causes principales : **croissance d'une couche de passivation (SEI)**



Augmentation de résistance interne



Vieillessement : 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

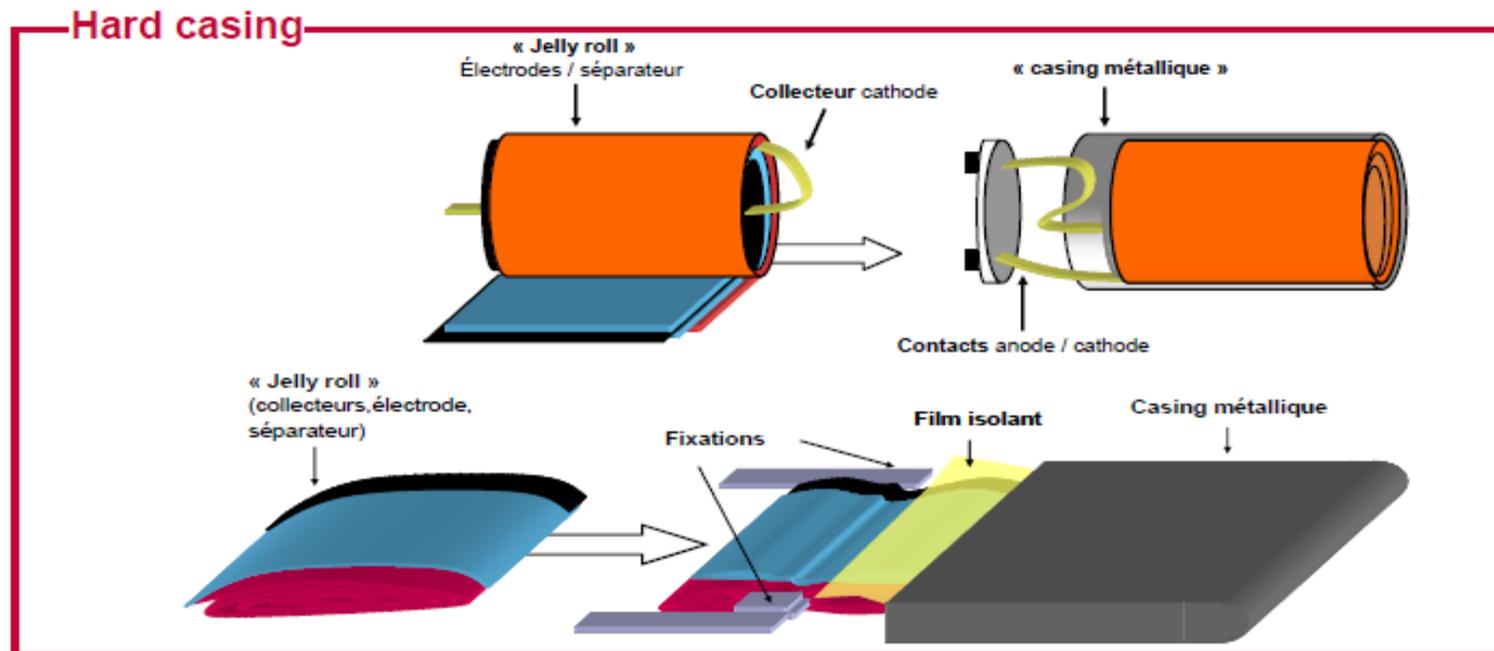
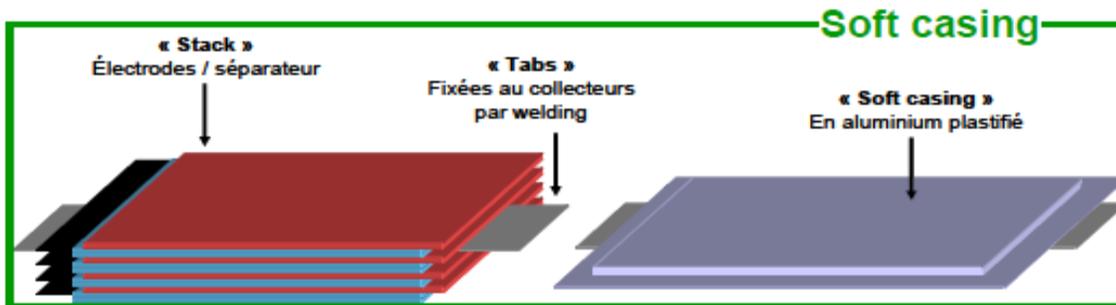
La croissance de la SEI entraîne
une consommation irréversible d'ions Li^+
qui entraîne une diminution des ions cyclables

=> **Diminution de capacité**

=> **Augmentation de la résistance**



Design des cellules Li-ion

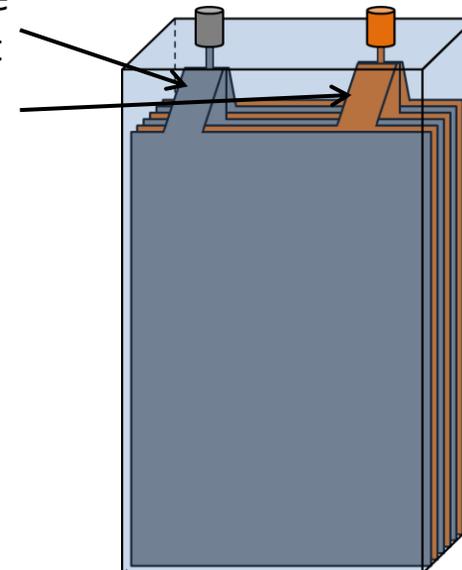




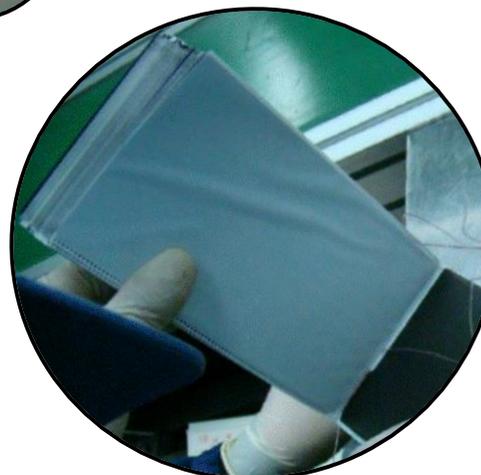
Constitution d'une cellule Li-ion



Connexions entre les collecteurs et les bornes



Eléments électrochimiques





Cylindrical Cell (Hardcase)

Pouch Cell (Softpack)

Prismatic Cell (Hardcase)



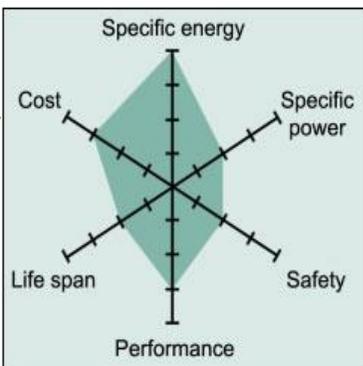
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

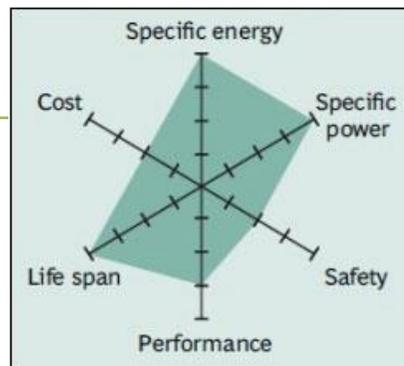


Abréviation	Matériau électrode positive	Matériau électrode négative	Tension nominale (V)	Tension utile (V)	Energie massique pratique (Wh/kg)
LCO	LiCoO ₂	C	3,6	4.1 – 3.3	150
NCA	LiNiCoAlO₂	C	3,6	4.1 – 3.3	150
NMC	LiNiMnCoO₂	C	3,6	4.1 – 3.3	145 – 160
LMO	LiMn₂O₄	C	3,8	4.1 – 3.7	110 – 120
LFP	LiFePO₄	C	3,2	3.3 – 3.0	100 – 110
LTO *	LiFePO ₄	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	2	2.0 – 1.8	50 – 70

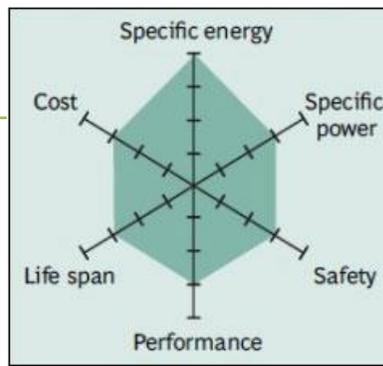
* dédiée charges rapides



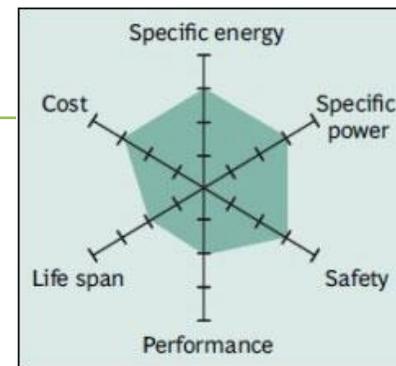
LCO



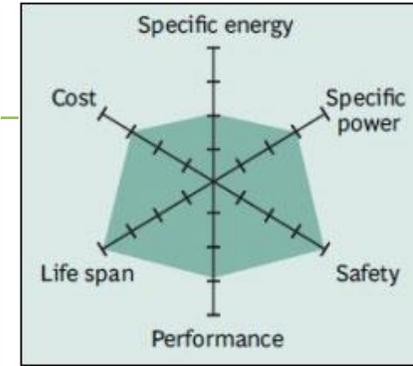
NCA



NMC



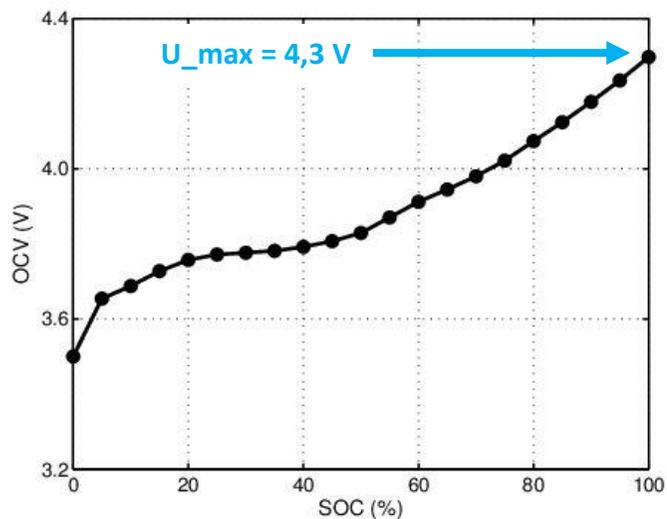
LMO



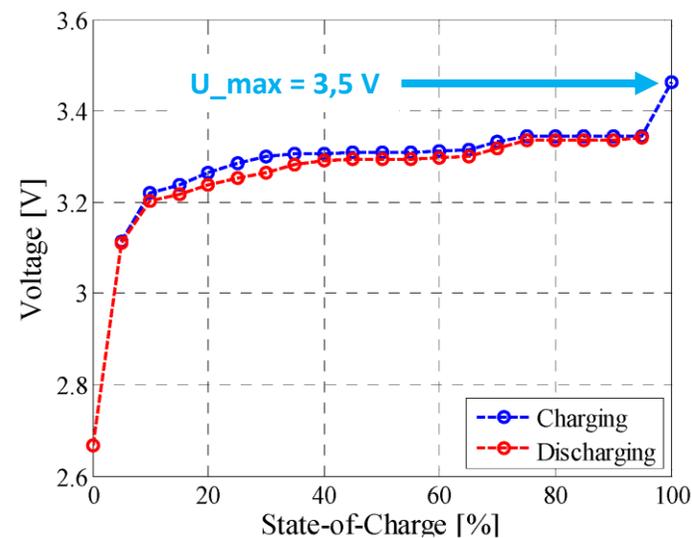
LFP



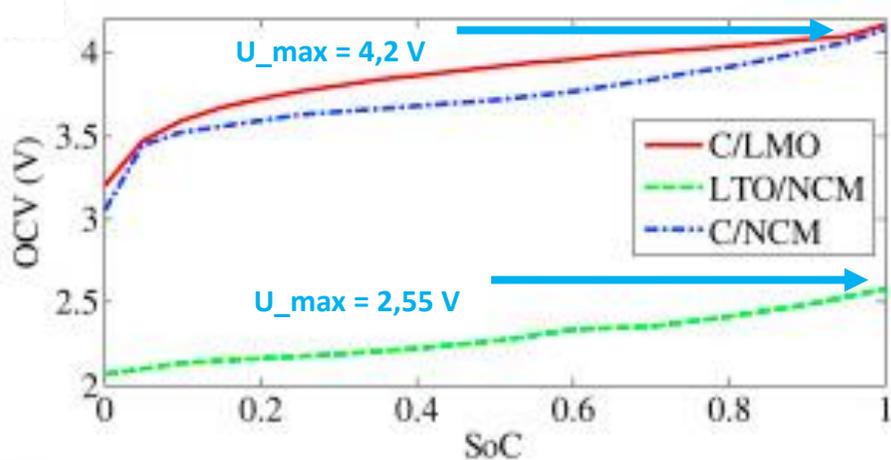
A chaque chimie son OCV en fonction du SoC



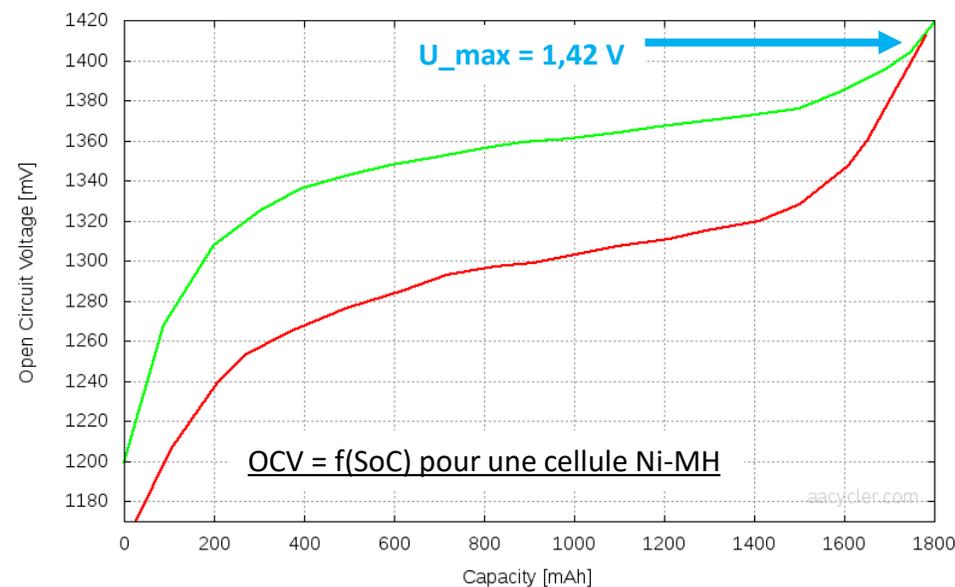
OCV = f(SoC) pour une cellule NMC/graphite



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



OCV = f(SoC) pour plusieurs chimies



OCV = f(SoC) pour une cellule Ni-MH



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 $\text{SoC} = f^{-1}(\text{OCV})$
- Comptage coulométrique

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

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

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



Sources réversibles

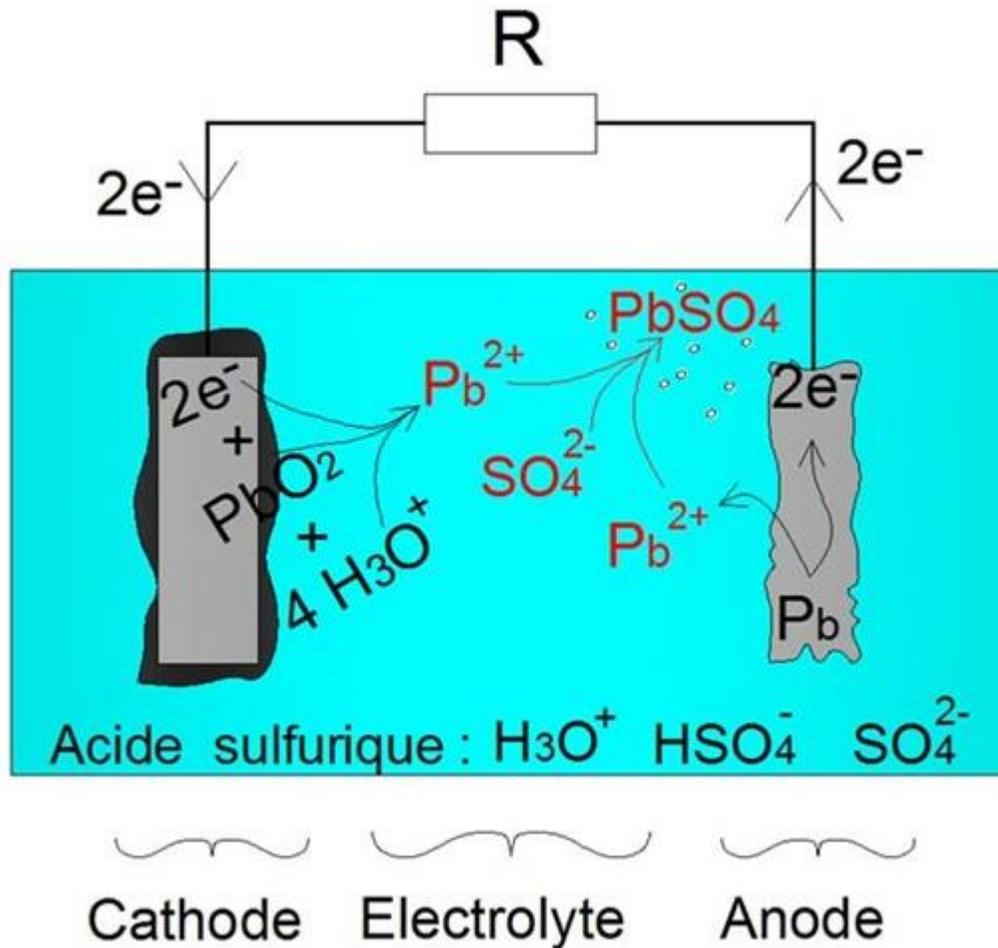
Divers

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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



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



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...)



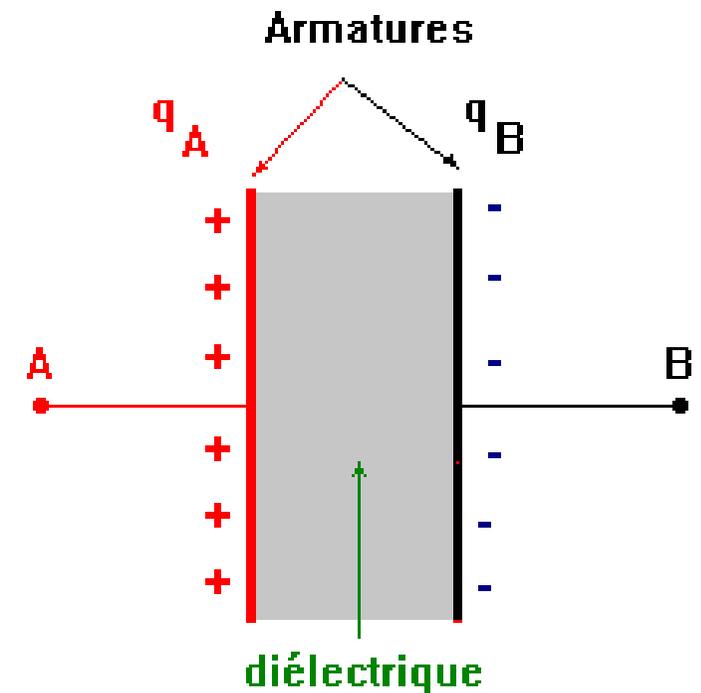
Condensateurs

- 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



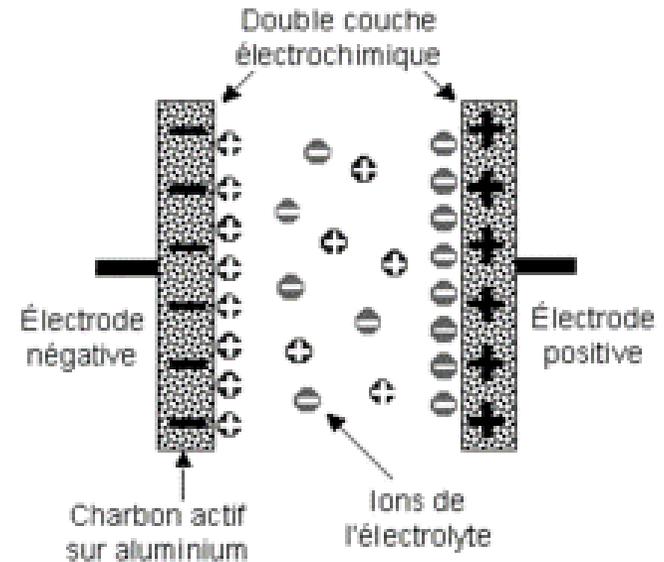


Supercondensateurs

- 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

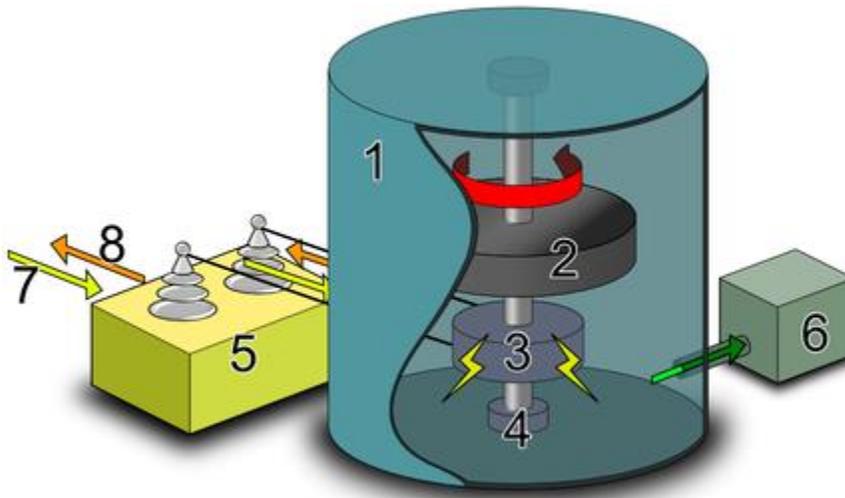
- Utilisations :
 - Récupération d'énergie au freinage
 - Stabilisation du réseau électrique
 - [LIEN](#)





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





Sources irréversibles

Piles

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : sources d'énergie électrique

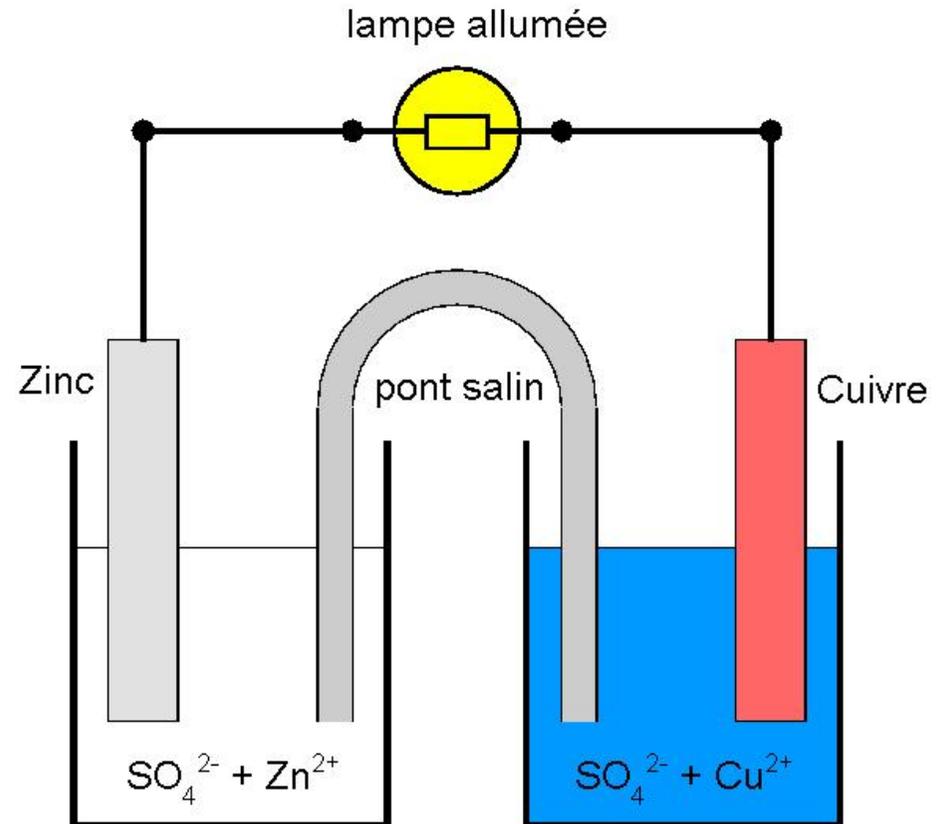


Piles

- 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

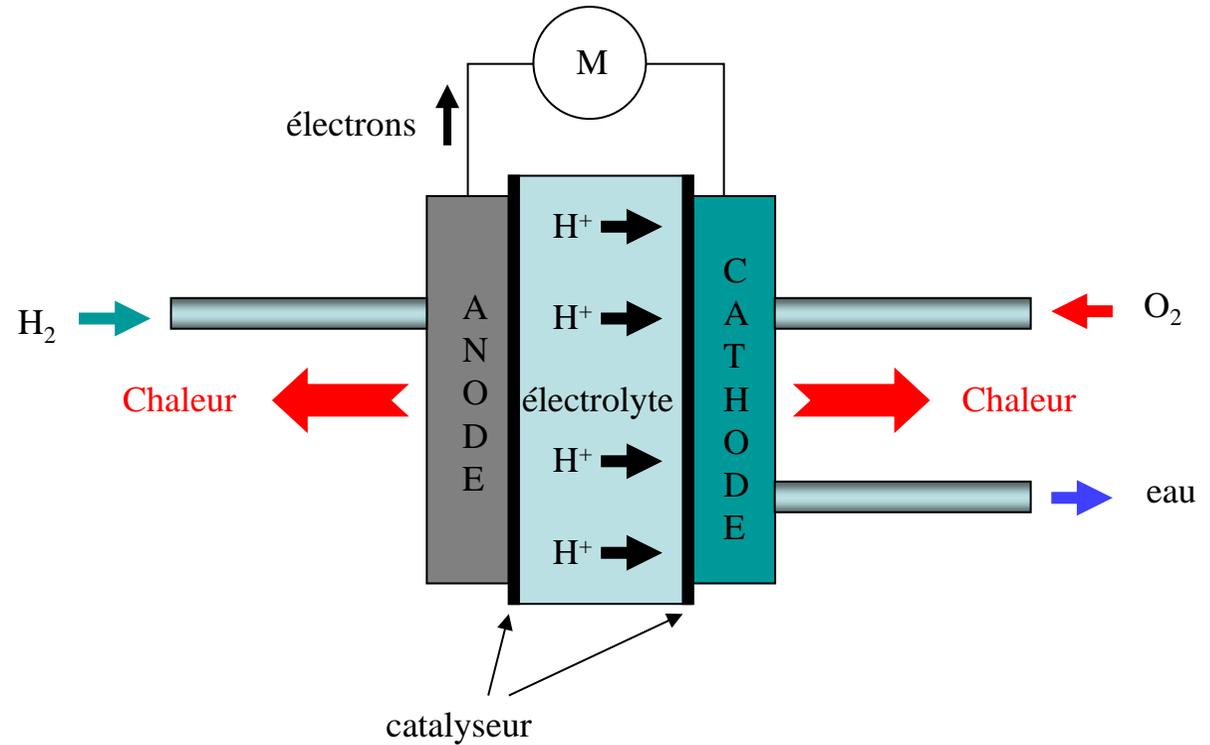
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

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





Sources irréversibles

Panneaux photovoltaïques

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

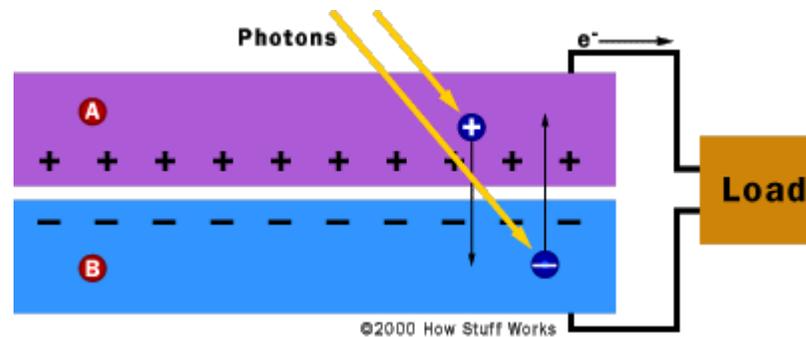
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



Panneaux photovoltaïques (PV)

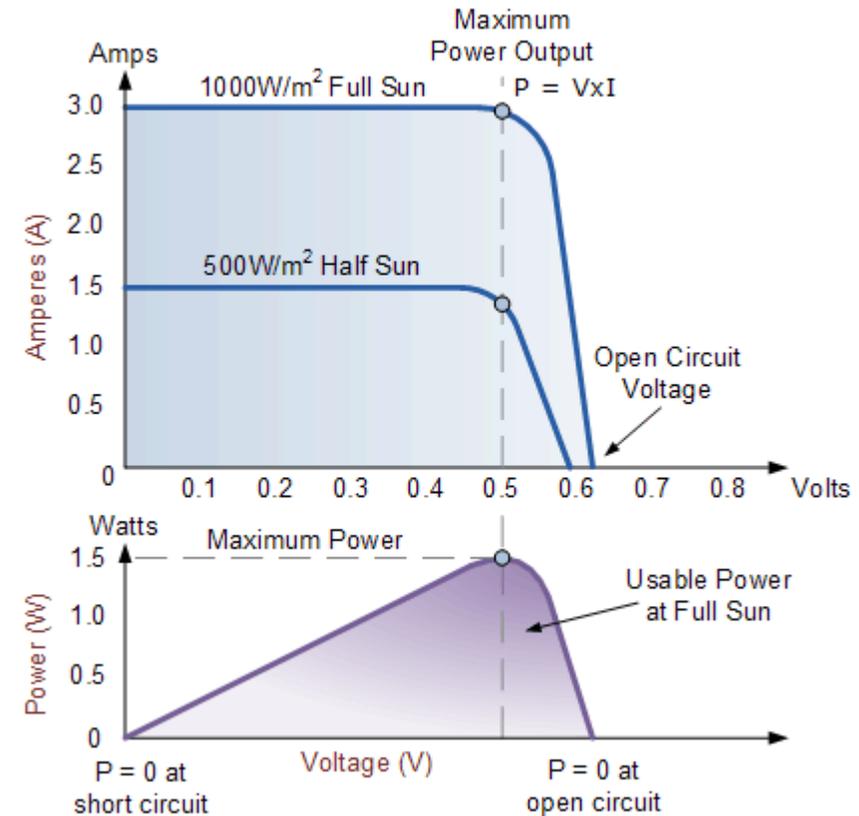
- Conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique
- Chaque photon suffisamment énergétique transmet son énergie à un électron, le mettant en mouvement en laissant un « trou » derrière lui.
- Par conception, le champ électrique interne entraîne les charges.





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
- $\frac{\eta_{elec}}{\eta_{soleil}} \approx 15\%$ (*produits grand public*)





Utilisation de plusieurs sources

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

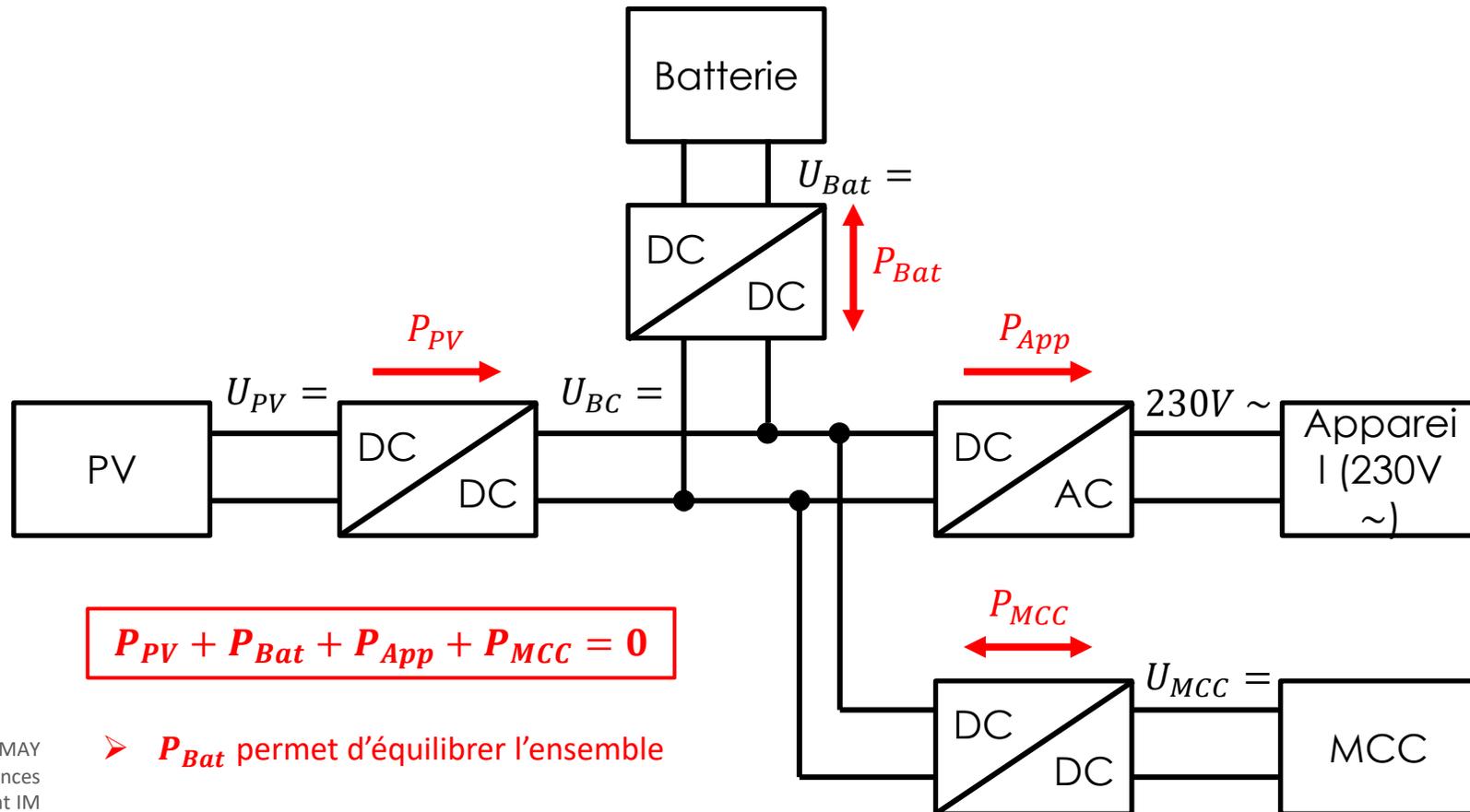
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : sources d'énergie électrique



Utilisation de plusieurs sources

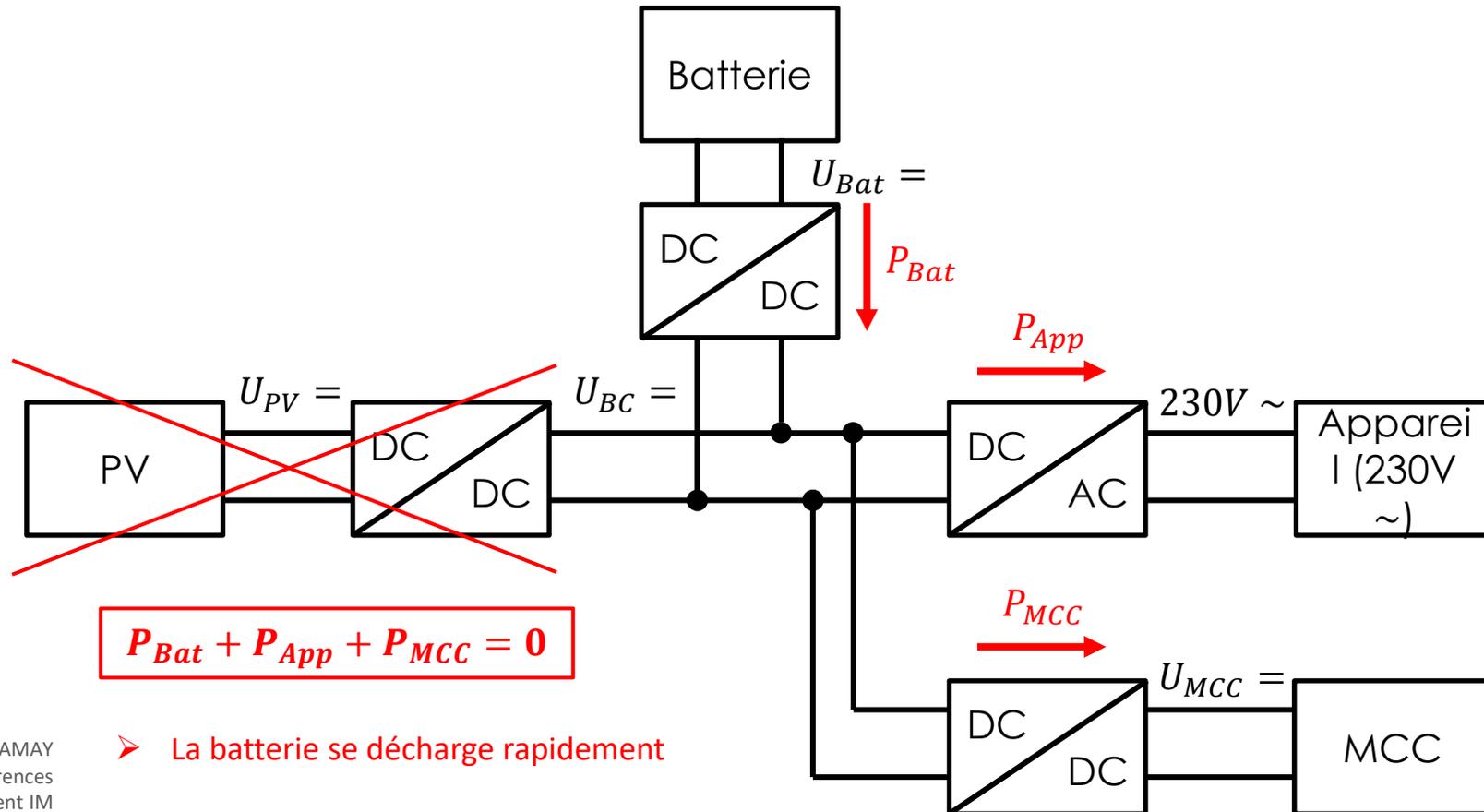
- Souvent : passage par un « bus continu » sur lequel on branche tous les composants d'un système





Utilisation de plusieurs sources

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

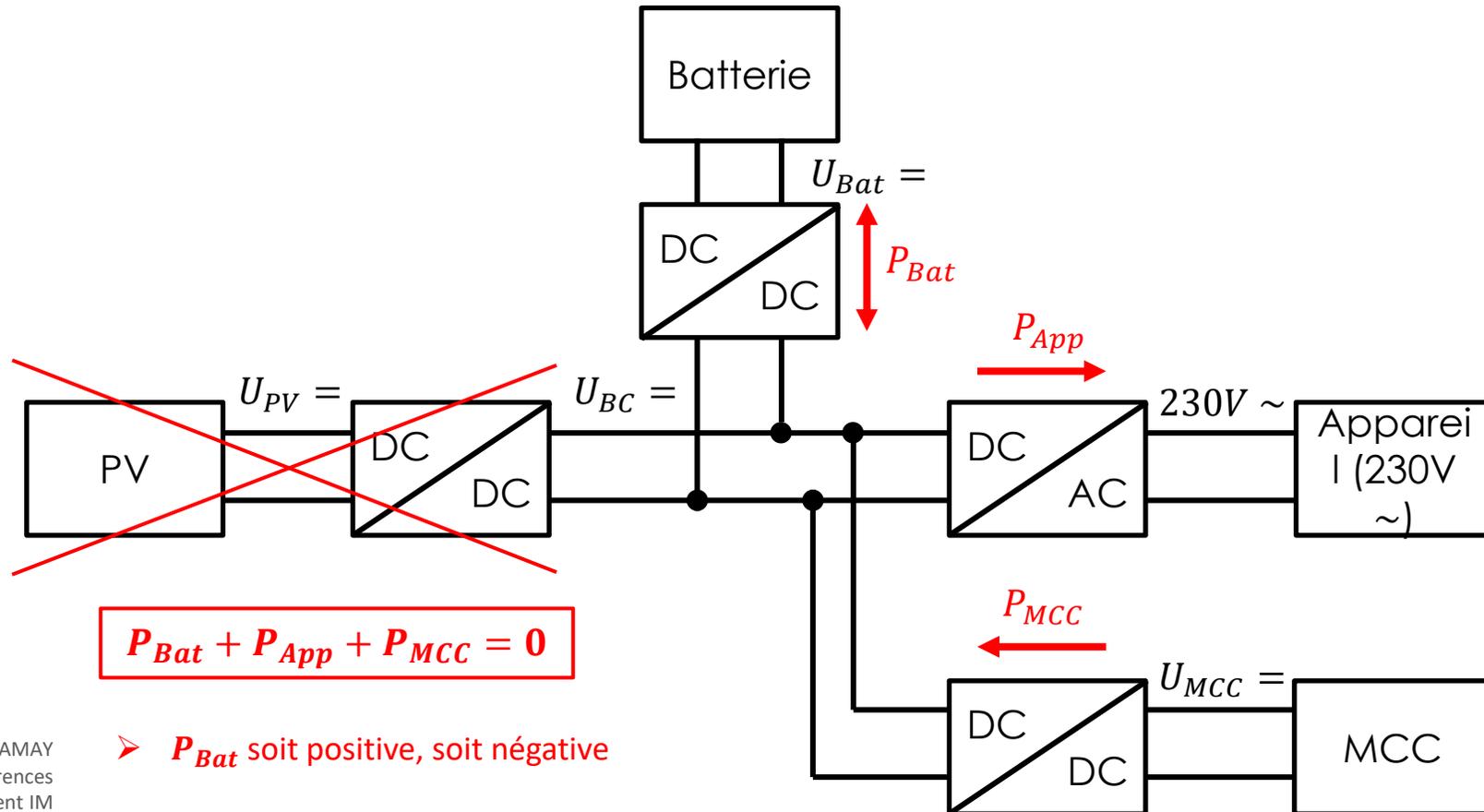


➤ La batterie se décharge rapidement



Utilisation de plusieurs sources

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



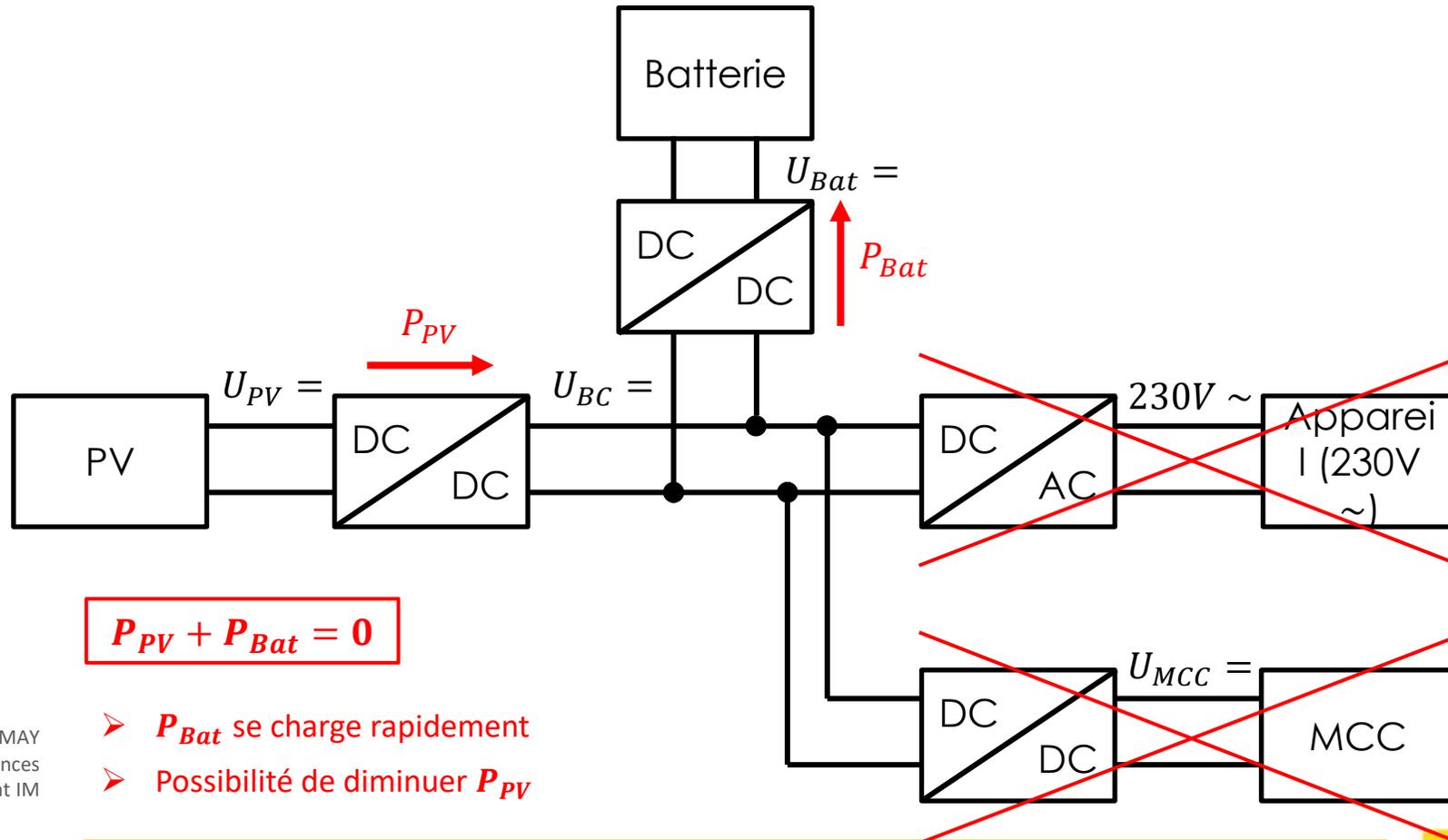
$$P_{Bat} + P_{App} + P_{MCC} = 0$$

➤ P_{Bat} soit positive, soit négative



Utilisation de plusieurs sources

- Cas d'un soleil fort
- Pas de consommation



$P_{PV} + P_{Bat} = 0$

- P_{Bat} se charge rapidement
- Possibilité de diminuer P_{PV}

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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