

# Formation Batterie - BTS Électrotechnique

Mercredi 7 avril 2021 9h - 17h

Serge PELISSIER

Directeur du laboratoire Eco7

Eco Gestion des Systèmes Energétiques Pour les Transports



CAMPUS  
DES MÉTIERS  
ET DES  
QUALIFICATIONS  
Auto'Mobilités  
Auvergne-Rhône-Alpes

**CARMA**  
AUVERGNE RHÔNE ALPES  
EUROPEAN CLUSTER  
FOR MOBILITY SOLUTIONS

## Module 1 : Les différentes technologies de batterie

1. Quelles sont les différentes technologies de batteries et leurs caractéristiques ?
2. Quelle batterie associer à quel usage ?
3. Quelles sont les évolutions technologiques des batteries et des moyens de charge ?

## Module 2 : Principes de fonctionnement d'une batterie

1. Quels sont les phénomènes physiques mis en jeu dans une cellule lithium ion ?
2. Quel est le comportement électrique d'une cellule et ses caractéristiques ?
3. Quels sont les moyens de diagnostic et de caractérisation ?

## Module 3 : Règles et procédures d'utilisation d'une batterie lithium ion

1. Quelles sont les différents risques associés à l'utilisation des batteries lithium ion ?
2. Quels sont les éléments qui en assurent le bon fonctionnement et la sécurité ?
3. Quels sont les facteurs de vieillissement d'une cellule lithium ion ?

## Module 4 : Impacts environnementaux

1. Quels sont les principaux impacts environnementaux ?
2. Quelles sont les contraintes réglementaires ?
3. Quelles sont les solutions ?

*Ce qui était prévu ... tout y est ou presque, pas toujours dans cet ordre ☺*

## Petite comparaison des densités d'énergie

	Essence	Batterie Plomb	Batterie Li-ion
Energie massique	13 000 Wh/kg	40 Wh/kg	100-200 Wh/kg

**Attention : rendement moteur essence = 30% ; rendement moteur électrique = 80%**

## Petite comparaison des facilités de transfert d'énergie au véhicule

(d'après A. Rufer – EPFL)

### Remplissage d'un réservoir

#### d'essence à une station :

- Débit de la pompe : 38 litres/min
- Energie spécifique : 42MJ/kg
- Densité : 0.83kg/litre

Puissance de transfert  $\approx 22 \text{ MW}$  (!!?)

Pertes (pompe)  $\approx 500 \text{ W}$

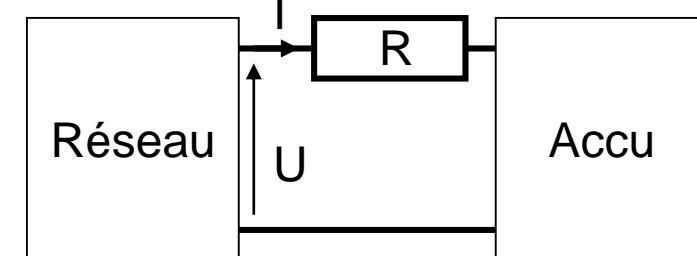
### Remplissage d'un accumulateur électrique :

On veut la même puissance (22 MW)  
avec les mêmes pertes (500 W)

- la puissance est donnée par  $UI$
- les pertes sont fixées par  $RI^2$
- la résistance est liée à la masse de Cuivre

(pour une longueur de câble donnée – 10m)

U (V)	I (A)	R ( $\mu \Omega$ )	$\Phi$ du câble (mm)
1 000	22 000	1	460
10 000	2 200	100	46
100 000	220	10 000	4,6



### Capacité en Ah :

une batterie de 1Ah se décharge en 1h sous un courant de 1A, en 2h sous un courant de 0.5A, etc..

### Energie en Wh :

énergie stockée, liée à la valeur précédente, mais en tenant compte de la tension

### Puissance en W :

puissance maximale que la batterie peut fournir – il faut préciser pendant combien de temps (en général 10 s) et distinguer « en charge » ou « en décharge »

### Rapport P/E :

rapport entre la puissance et l'énergie de la batterie.

Il existe des batteries typées « Energie » et d'autre typées « Puissance »

*VE : puissance 80 kW, énergie embarquée 40 kWh*

*P/E = 2 → batterie d'énergie*

*VEH : puissance 80 kW, énergie embarquée 2 kWh*

*P/E = 40 → batterie de puissance*

### Etat de charge en % (SOC = State of Charge) :

rapport de la capacité actuelle en Ah à la capacité initiale  
SOC = 100 % : batterie chargée

### Profondeur de décharge en % (DOD = depth of discharge) :

DOD = 1 – SOC

DOD = 100 % : batterie déchargée

### Régime de courant (1C, 2C, C/2, etc...):

Valeur du courant de la batterie exprimée par rapport à la capacité.  
1C est le courant qui décharge la batterie en 1h, 2C est le double

*Exemple pour une batterie de 8Ah :*

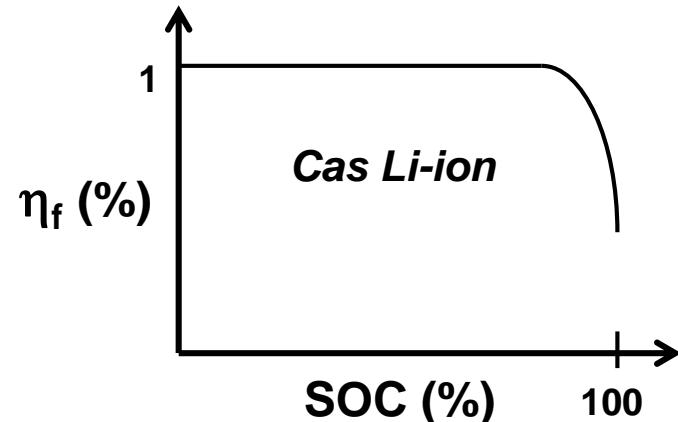
$1C = 8A ; 2C = 16A ; C/2 = 4A$  (en charge ou en décharge)

Le rapport P/E vaut  $U_{\text{nom}} \cdot I_{\text{max}} / U_{\text{nom}} \cdot \text{Capacité} = I_{\text{max}} / \text{Capacité}$

**$\Leftrightarrow$  le régime de courant max en C donne le rapport Puissance/Energie**

## Rendement faradique $\eta_f$ :

- Ah déchargés / Ah chargés
- dépend du SOC
- Lithium ion :  $\eta_f \approx 1$

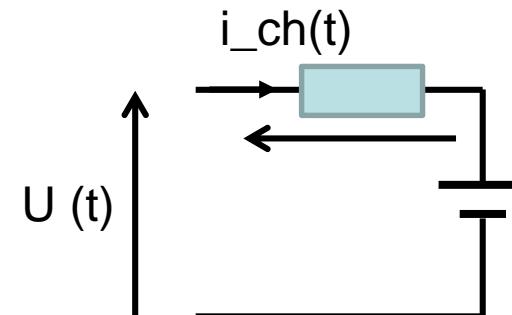
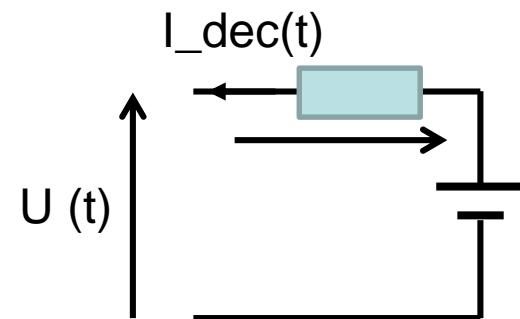


## Rendement énergétique $\eta_e$ :

- énergie récupérée / énergie fournie
- inférieur au rendement faradique  
(effet de l'impédance interne)

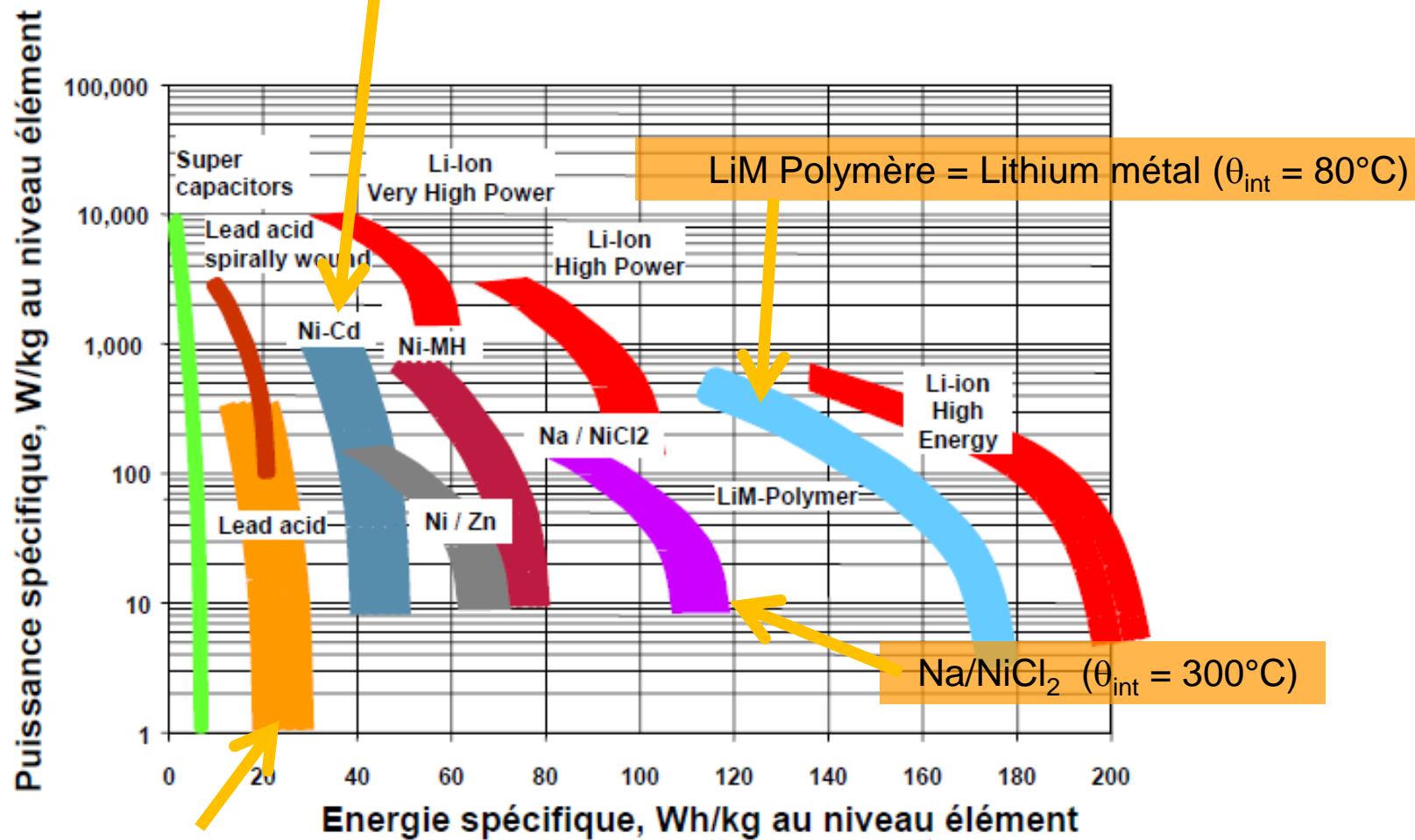
batteries	Rendement énergétique
Li-ion	0.85 – 0.95
Pb	0.7 – 0.83
NiMH	0.65 – 0.85
NiCd	0.65 – 0.85

Source : Rydh et al. Energy Conversion and Management Vol 46 (2005)



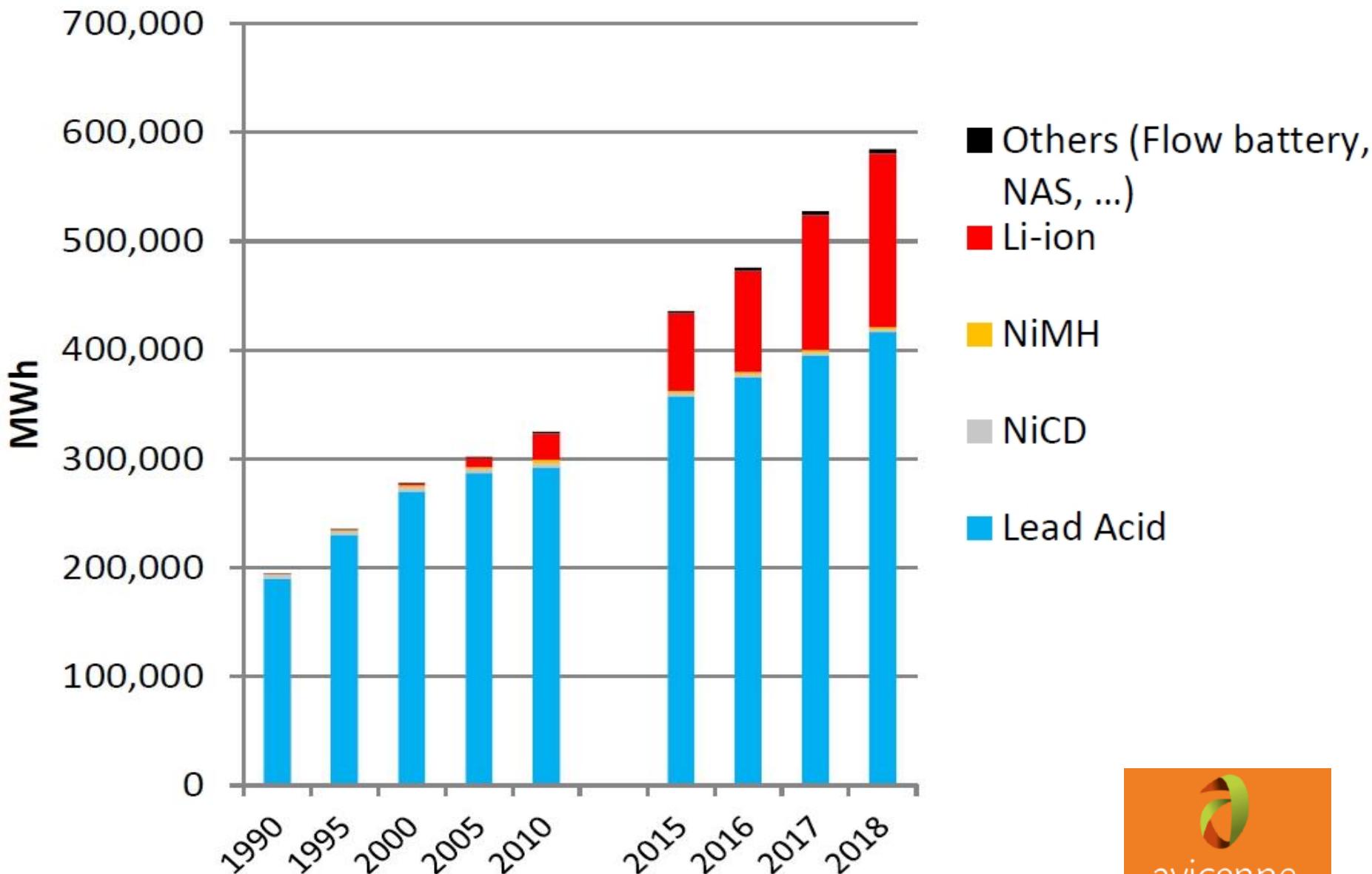
Ni/Cd « interdit » sauf application Sécurité/Alarme/Industrielle (toxicité du Cadmium)

## Comparaison des accumulateurs : puissance vs énergie

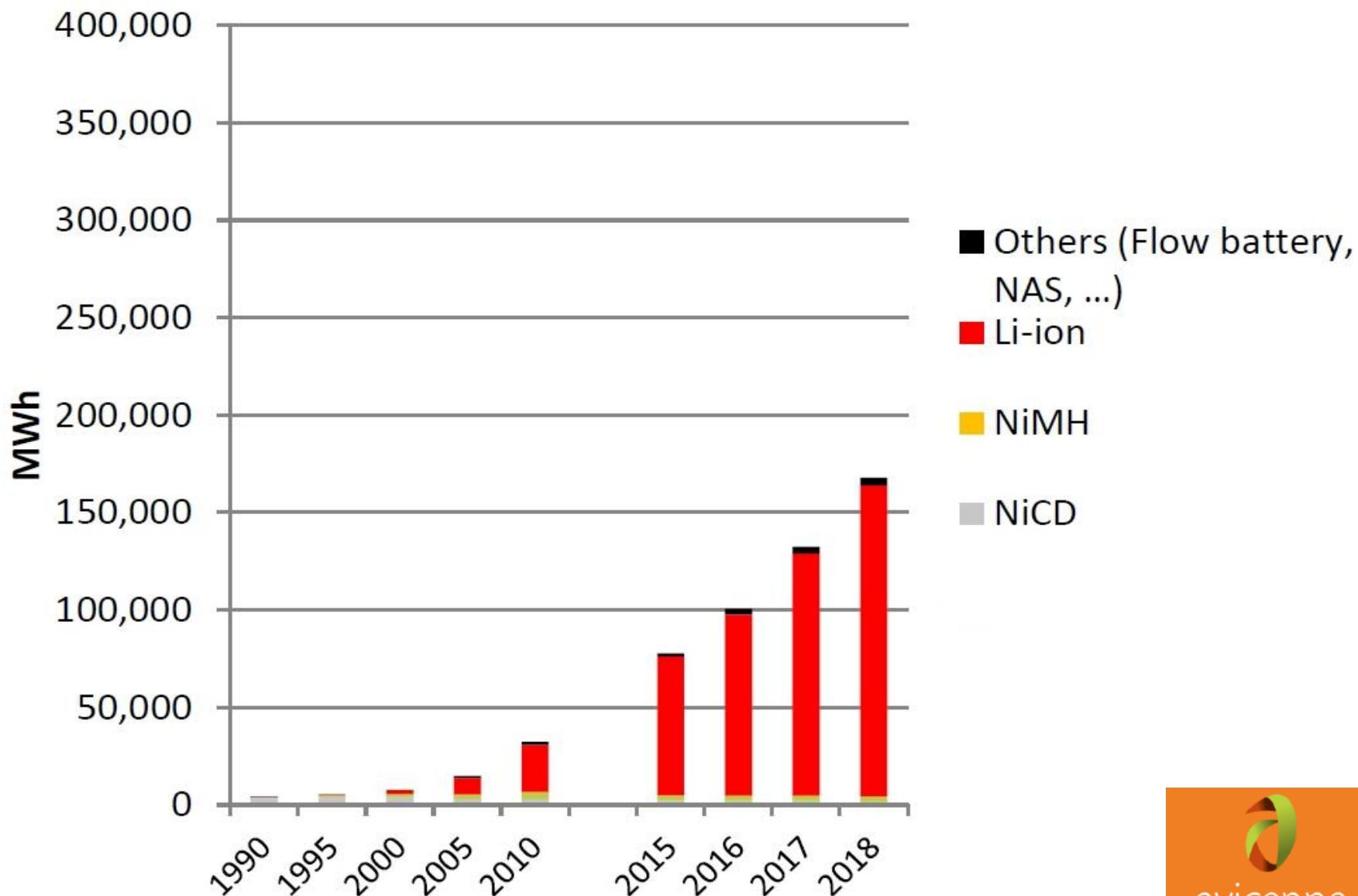


Plomb : puissance en charge << puissance en décharge

**Attention : valeurs massiques niveau élément ≠ avec électronique et ventilation**



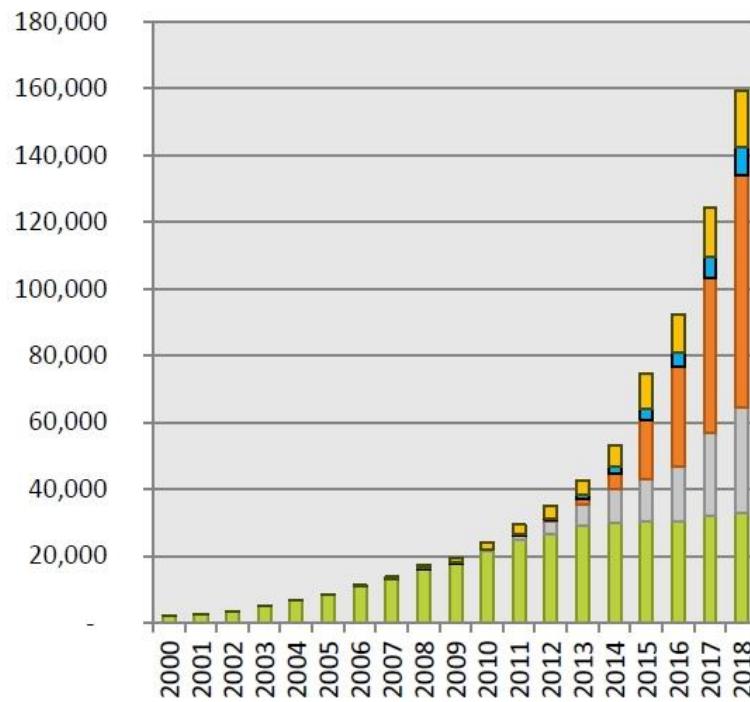
# Le marché des batteries (hors Plomb)



# Répartition des batteries Lithium par applications

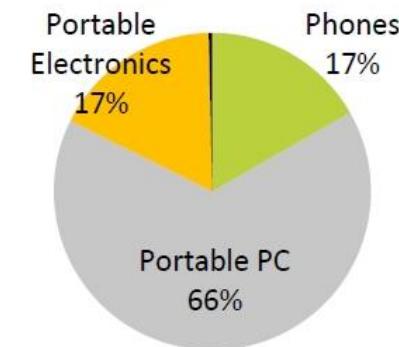
**Li-ion Battery sales,  
MWh, Worldwide, 2000-2018**

M Wh

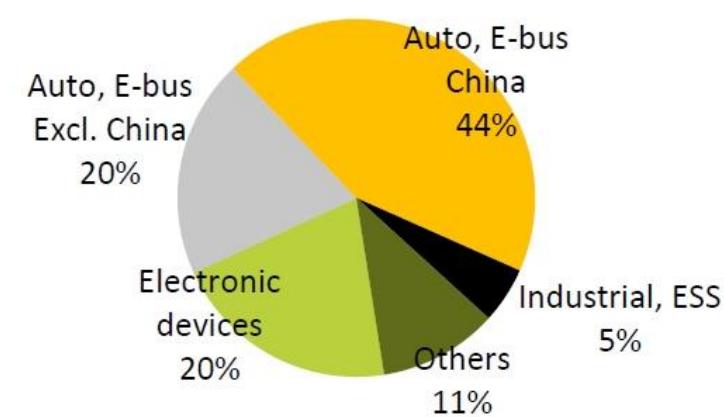


- Others
- Industrial, ESS
- Auto, E-bus China
- Auto, e-bus Excl. China
- Electronic devices

**2000: < 2GWh**



**2018: 160 GWh**

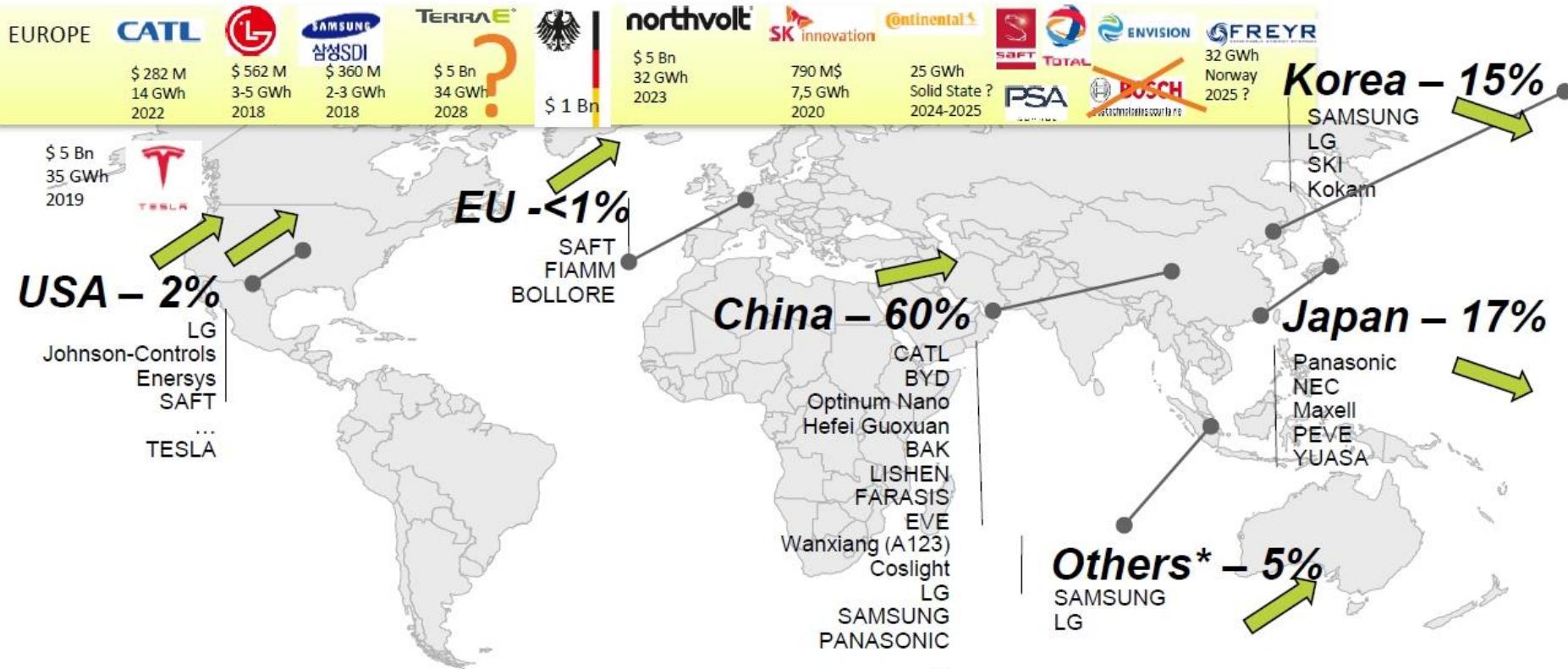


(1) Cell level

Others: medical devices, power tools, gardening tools, e-bikes...

## LITHIUM ION CELL PRODUCTION

European market demand  
~100 GWh in 2025



Source: AVICENNE 2019

\* OTSIE Parisien et autres



**Une batterie de téléphone portable**  
*1 élément unique*

**Une batterie d'ordinateur portable**  
*6 éléments (mise en série de 3 paquets de 2 en // )*



## Prius IV Toyota (Japon) 29 000 €

Batterie NiMH (168 éléments répartis en 28 modules),  
200 V - 1.3 kWh - pas de charge

Moteur électrique 53 kW  
Moteur thermique 72 kW  
Autonomie en mode électrique 2 km



## Prius rechargeable Toyota (Japon) 37 000 €



Batterie Lithium ion  
120 kg - 95 cellules - 350 V  
8.8 kWh - charge en 2~3h

Moteur synchrone 53 kW  
Moteur thermique 68 kW  
Autonomie en mode électrique > 50 km

# Exemples de véhicules électriques hybrides rechargeables



## Volvo XC60 T8 twin Engine

Moteur électrique : 64 kW

Moteur thermique : 240 kW

Batterie 10 kWh

Autonomie électrique 45 km

Poids total à vide 2100 kg

70 000 €





### Zoé – Renault (France)

23 700 € TTC (hors batterie)

Batterie Lithium ion 41 kWh – 400 V

**192 cellules** (12 modules) – 300 kg

Location 80 à 150 €/mois

Charge 20 h - 1h30 (à 43 kW)

Vitesse 135 km/h - Autonomie 400 km

Poids à vide 1500 kg

### Model S - Tesla Motors (USA)

82 000 €

Batterie Lithium ion 85 kWh – 375 V

**7104 éléments** (16 modules) – 600 kg

Charge 24h (3 kW) - 4h (22 kW)

vitesse 200 km/h - Autonomie 500 km

Poids à vide 2100 kg



Les 2 standards européens pour les connecteurs de recharge :

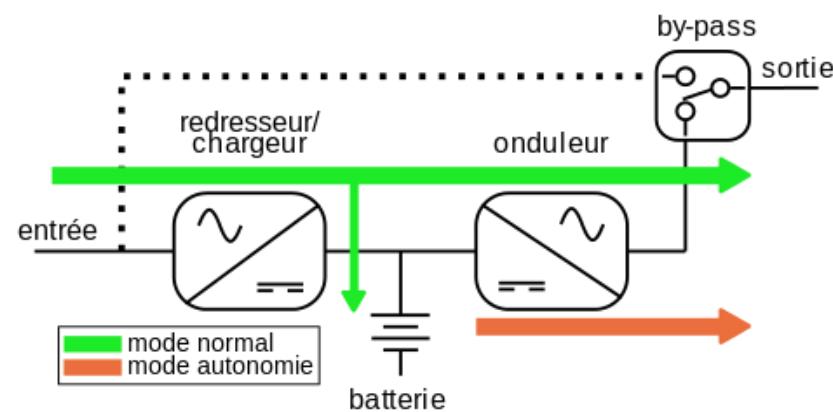


La prise type 2 pour des recharges AC (ou DC) jusqu'à 43 kW



La prise Combo CCS pour des recharges DC

# Applications stationnaires : stabilisation de réseau



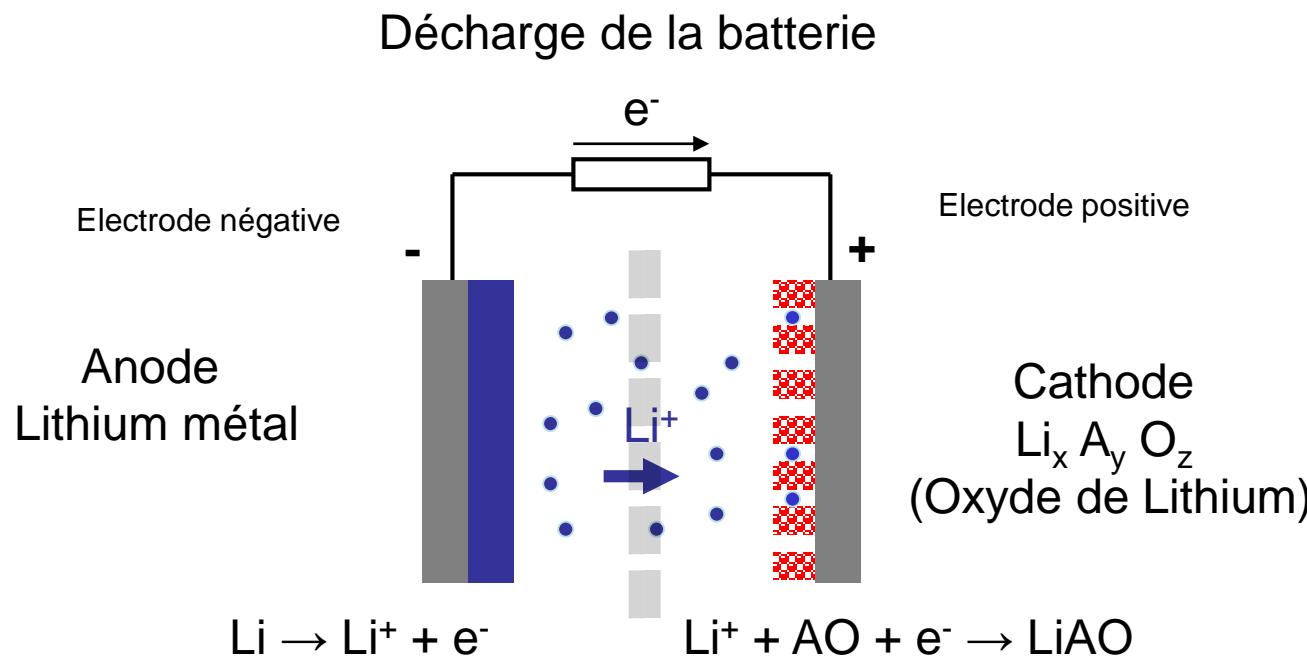
## Les familles de batteries au Lithium



⇒ Lithium métal

⇒ Lithium métal polymère

⇒ Lithium ion



Problèmes :

Instabilité de l'électrode de Lithium  
Apparition de dendrites (dépôt de Lithium à la surface)  
→ baisse de la capacité  
→ court-circuit

**Solution :**

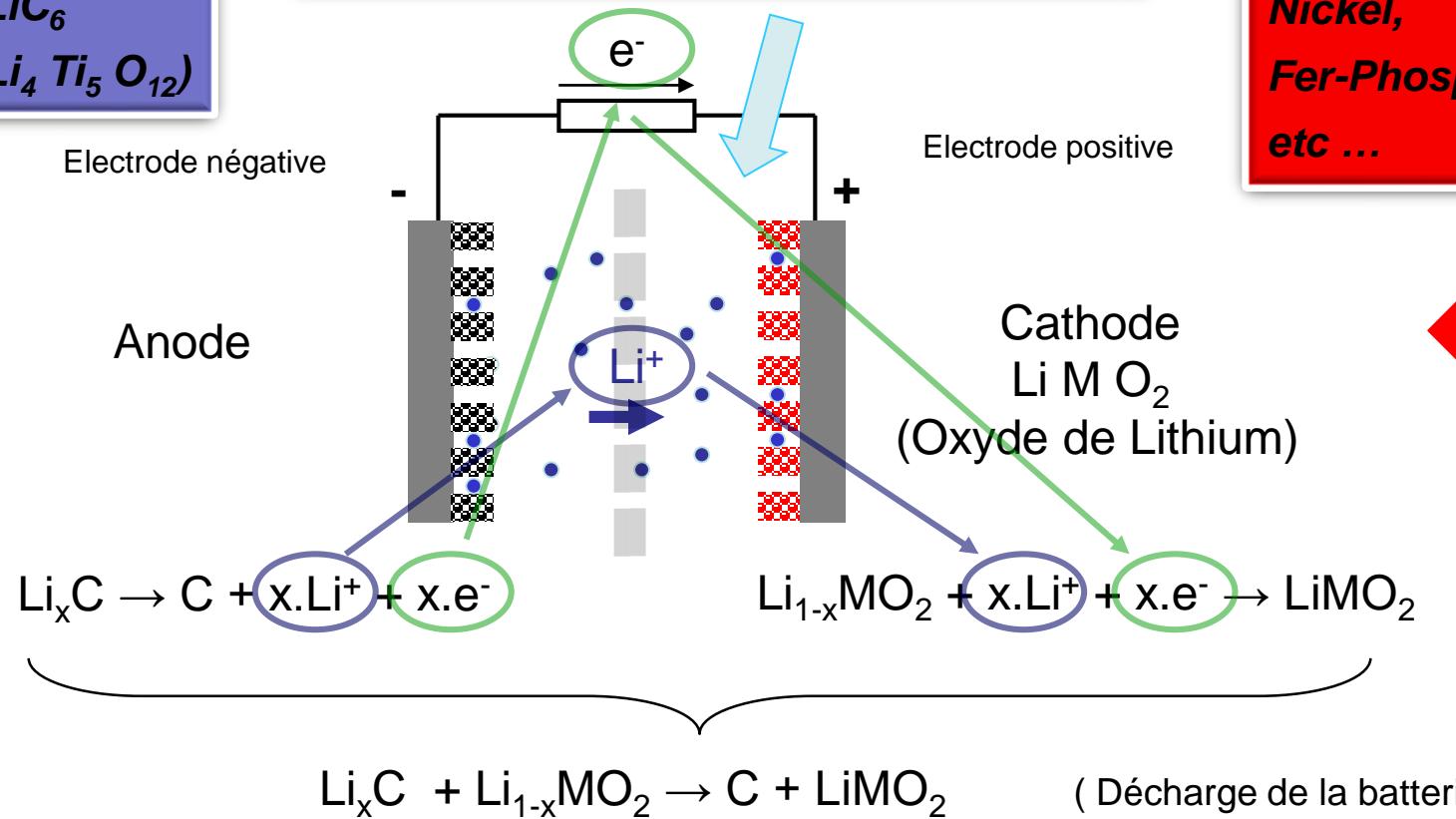
**la batterie « Lithium métal polymère » avec électrolyte polymère solide (mais  $\theta = 80^\circ\text{C}$ )**

# Le principe de fonctionnement des batteries Lithium ion

**Graphite  $LiC_6$**   
**Titanate ( $Li_4 Ti_5 O_{12}$ )**

L'**electrolyte** est un sel de Lithium ( $LiPF_6$ )  
mélangé à un solvant organique  
ou à un polymère (gel ou film)

**Cobalt,**  
**Manganèse,**  
**Nickel,**  
**Fer-Phosphate,**  
**etc ...**



# Les différents matériaux pour batteries Lithium ion

<i>Nom</i>	<i>Description</i>	<i>Electrode positive / négative</i>
<b>LCO</b>	Lithium Cobalt Oxide	$\text{Li Co O}_2$ / Graphite
<b>NCA</b>	Lithium Nickel Cobalt Aluminium	$\text{Li} (\text{Ni}_{0.85} \text{Co}_{0.1} \text{Al}_{0.05}) \text{O}_2$ / Graphite
<b>LFP - G</b>	Lithium Iron Phosphate	$\text{Li Fe PO}_4$ / Graphite
<b>NMC</b>	Lithium Nickel Cobalt Manganese	$\text{Li} (\text{Ni}_{1/3} \text{Co}_{1/3} \text{Mn}_{1/3}) \text{O}_2$ / Graphite
<b>LMS</b>	Lithium Manganese Spinel	$\text{Li Mn O}_2$ or $\text{Li Mn}_2 \text{O}_4$ / $\text{Li}_4 \text{Ti}_5 \text{O}_{12}$
<b>LTO</b>	Lithium Titanium	$\text{Li Mn O}_2$ / $\text{Li Ti O}_2$
<b>MNS</b>	Manganese Titanium	$\text{Li Mn}_{1.5} \text{Ni}_{0.5} \text{O}_4$ / $\text{Li}_4 \text{Ti}_5 \text{O}_{12}$
.../...		

Source : Institute of Transportation Studies University of California Davis, CA – rapport UCD-ITS-RR-08-14 , may 2008

# Les différents matériaux pour batteries Lithium ion

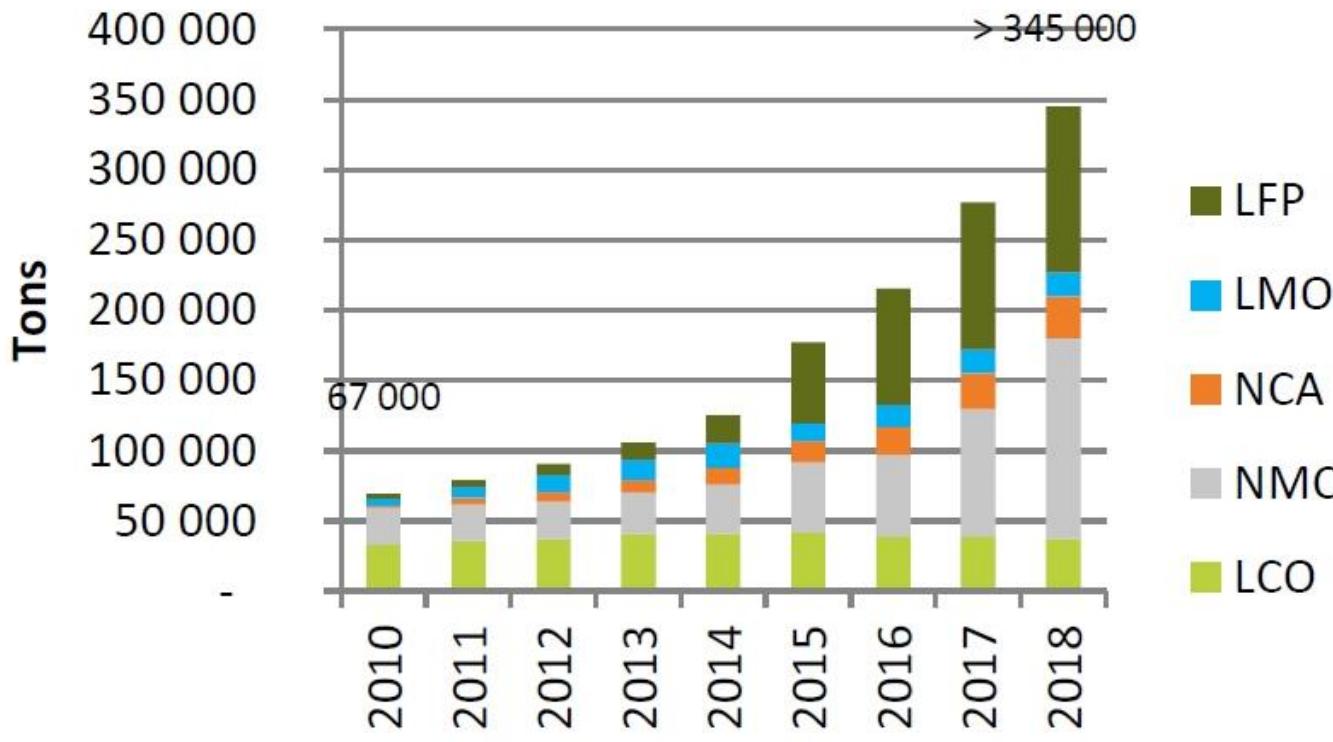
Type	U (V)	Wh/kg	avantages	Inconvénients	Principales applications
LCO	3.6	150-200	Forte énergie, bonne durée de vie	Instabilité thermique, moyenne puissance	Informatique, téléphonie
LMO	3.8	100-150	Forte puissance, stabilité thermique	Moyenne énergie	Outilage, automobile
NCA	3.6	200-260	Bon compromis (énergie - puissance - durée de vie)	Instabilité thermique	Automobile, industrie, médical
NMC	3.7	150-220	Meilleur compromis (énergie - puissance - durée de vie - stabilité)	Bataille de brevets	Outilage, automobile, industrie, médical
LFP	3.3	90-120	Meilleure stabilité thermique, forte puissance	Faible énergie, détermination du SOC	Outilage, stationnaire
LTO	2.4	50-80	Fonctionne à basse température, charge rapide	Faible énergie, coût élevé	Automobile, stationnaire

Source : Blomgren - *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 164 (1), 2017) et [Batteryuniversity.com](http://Batteryuniversity.com)

# Les différents matériaux pour batteries Lithium ion

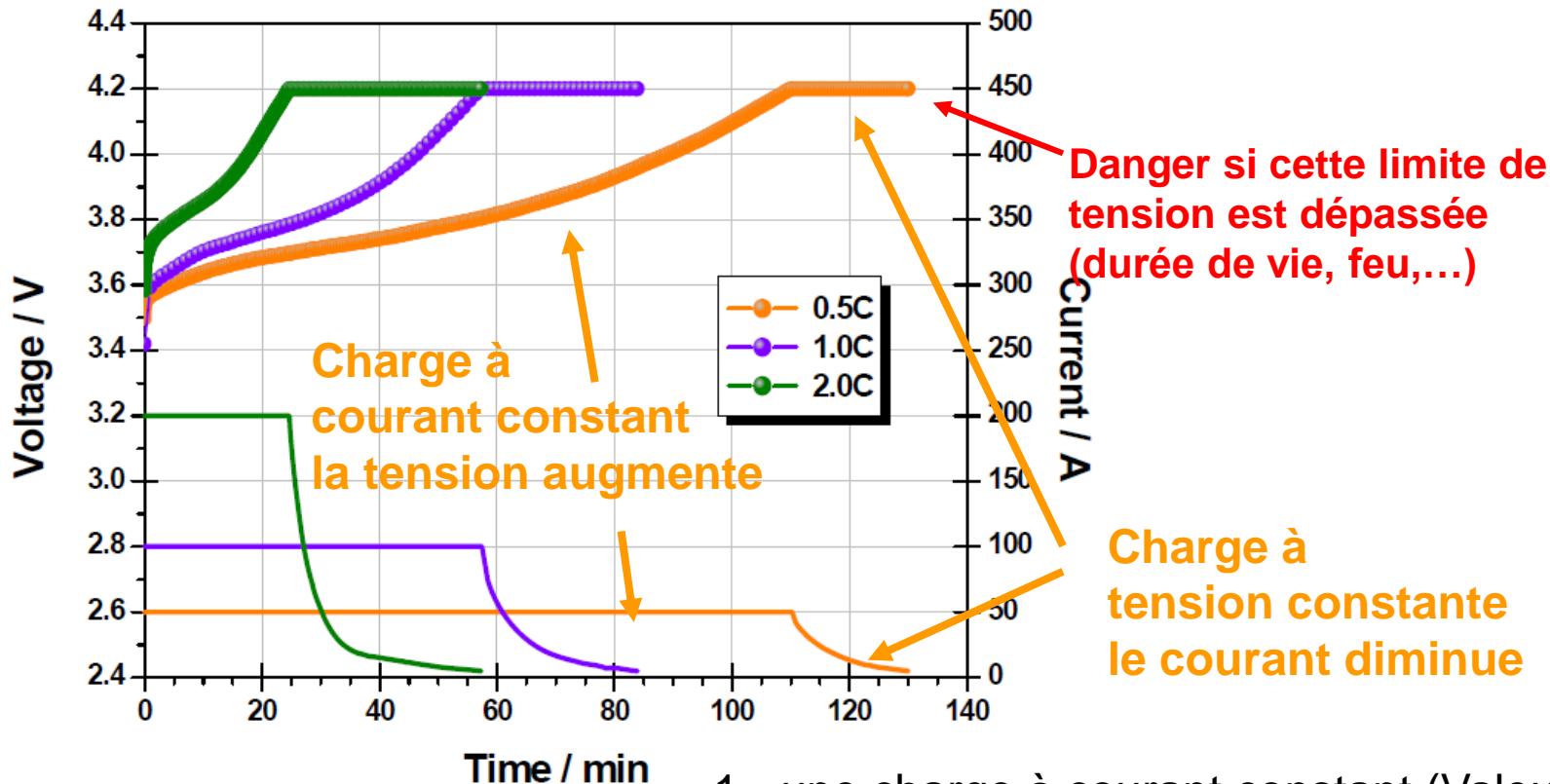
**Chaque type (LCA, NCA, LTO,...) a des caractéristiques propres : tension nominale, courant maxi, durée de vie, densité d'énergie,....**

- La dénomination « batterie lithium » est imprécise
- La dénomination « lithium polymère » est trompeuse car il existe des batteries *Lithium métal polymère* et des *Lithium ion polymère*
- La dénomination « lithium ion » doit être complétée par le type de chimie (NCA, LTO, LFP...)



SLPB 804603306H 1.0C = 100A

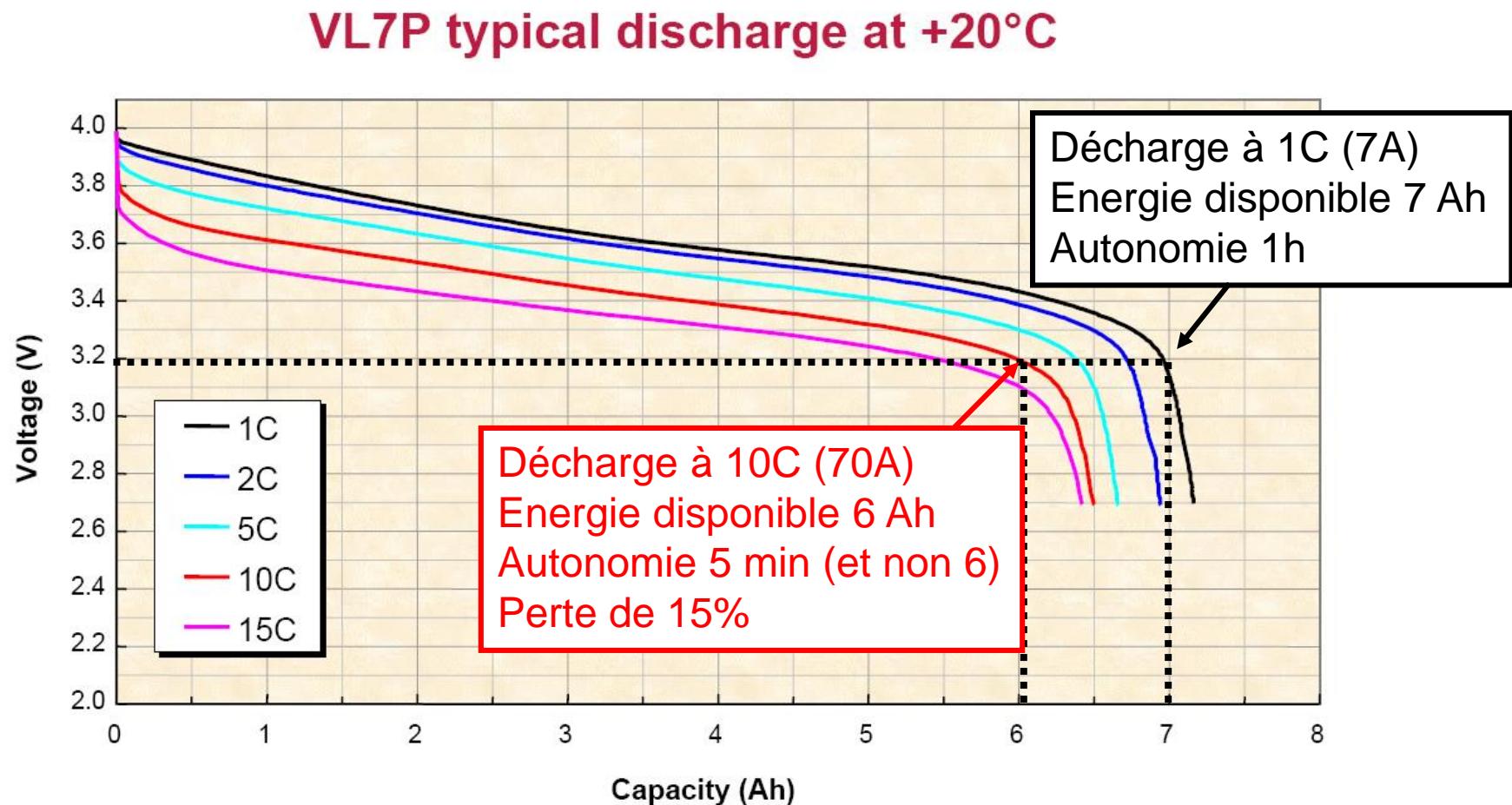
❖ Charge : CC-CV, 0.5C ~ 2.0C, 4.2V, 5.0A Cut-off @ 23°C ± 3°C



- 1 - une charge à courant constant (Valeur ≈ 1 C)
- 2 - une charge à tension constante
- 3 - une fin de charge sur ***critère de courant***

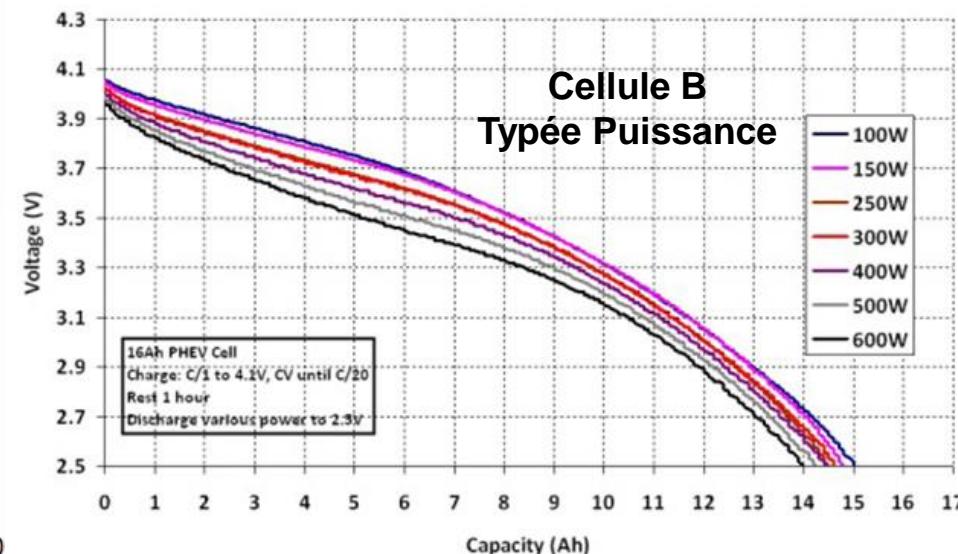
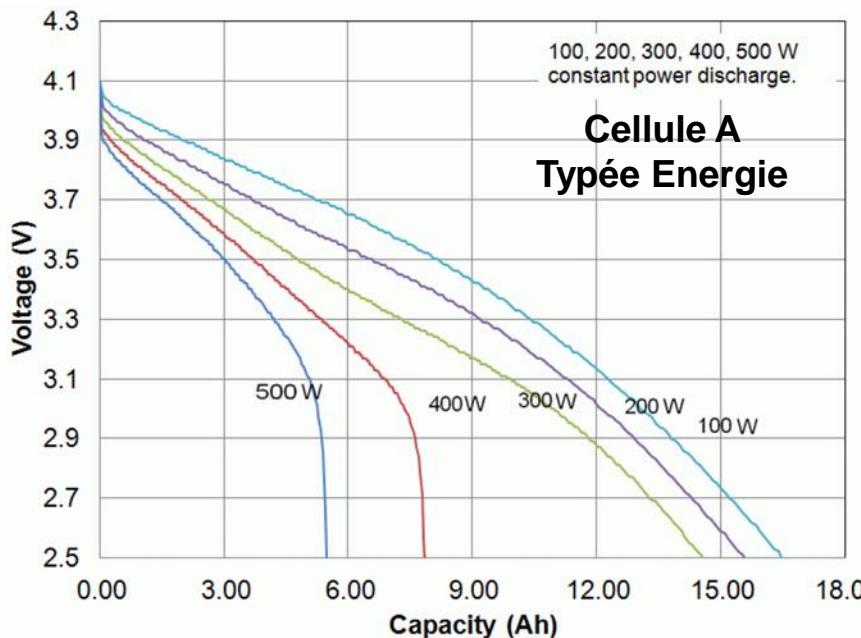
⇒ une durée de charge ≈ 1h - 1H30

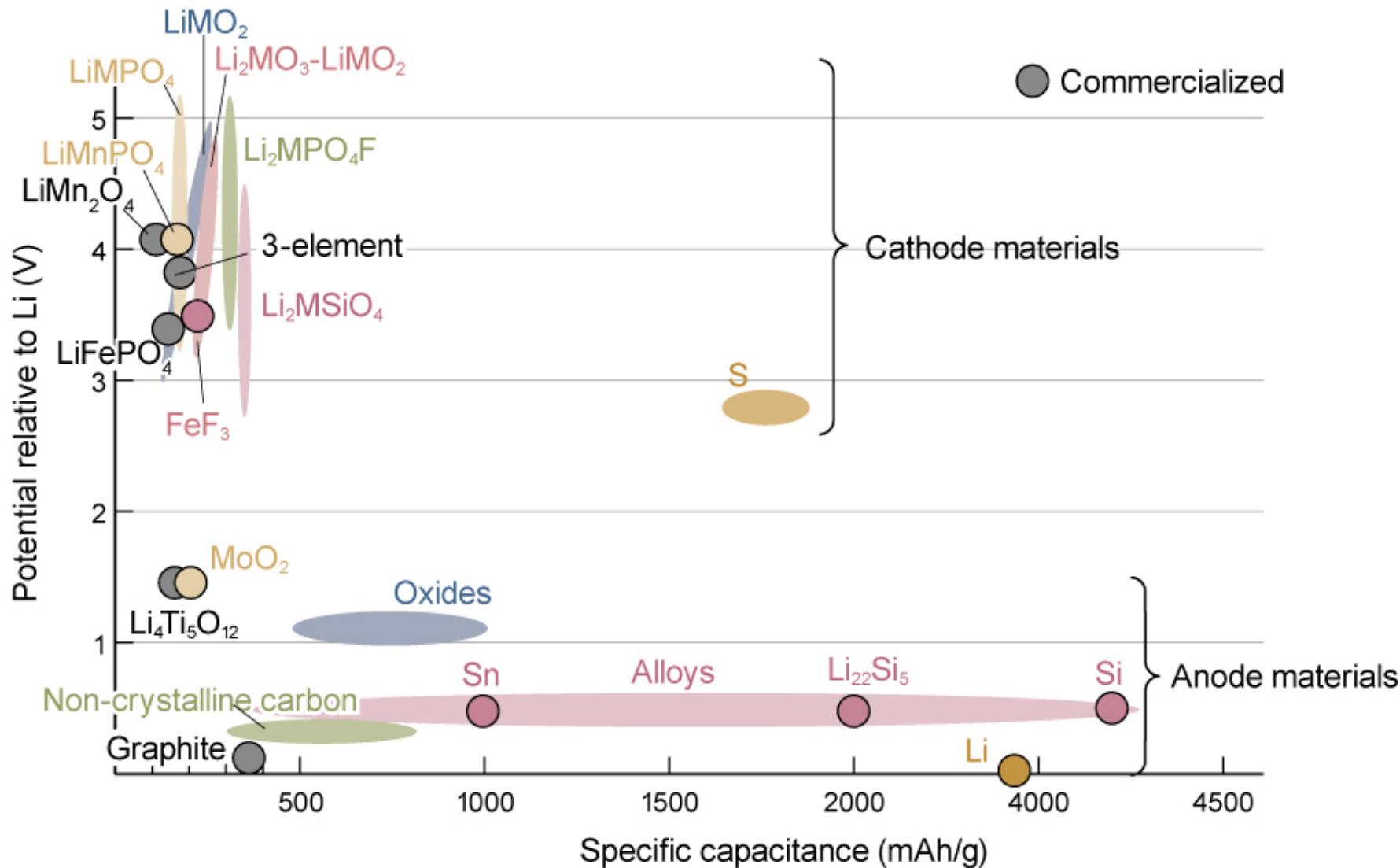
Comme pour le NiMH, les Ah déchargés dépendent peu du régime de décharge



# Comparaison de cellules type énergie/ puissance

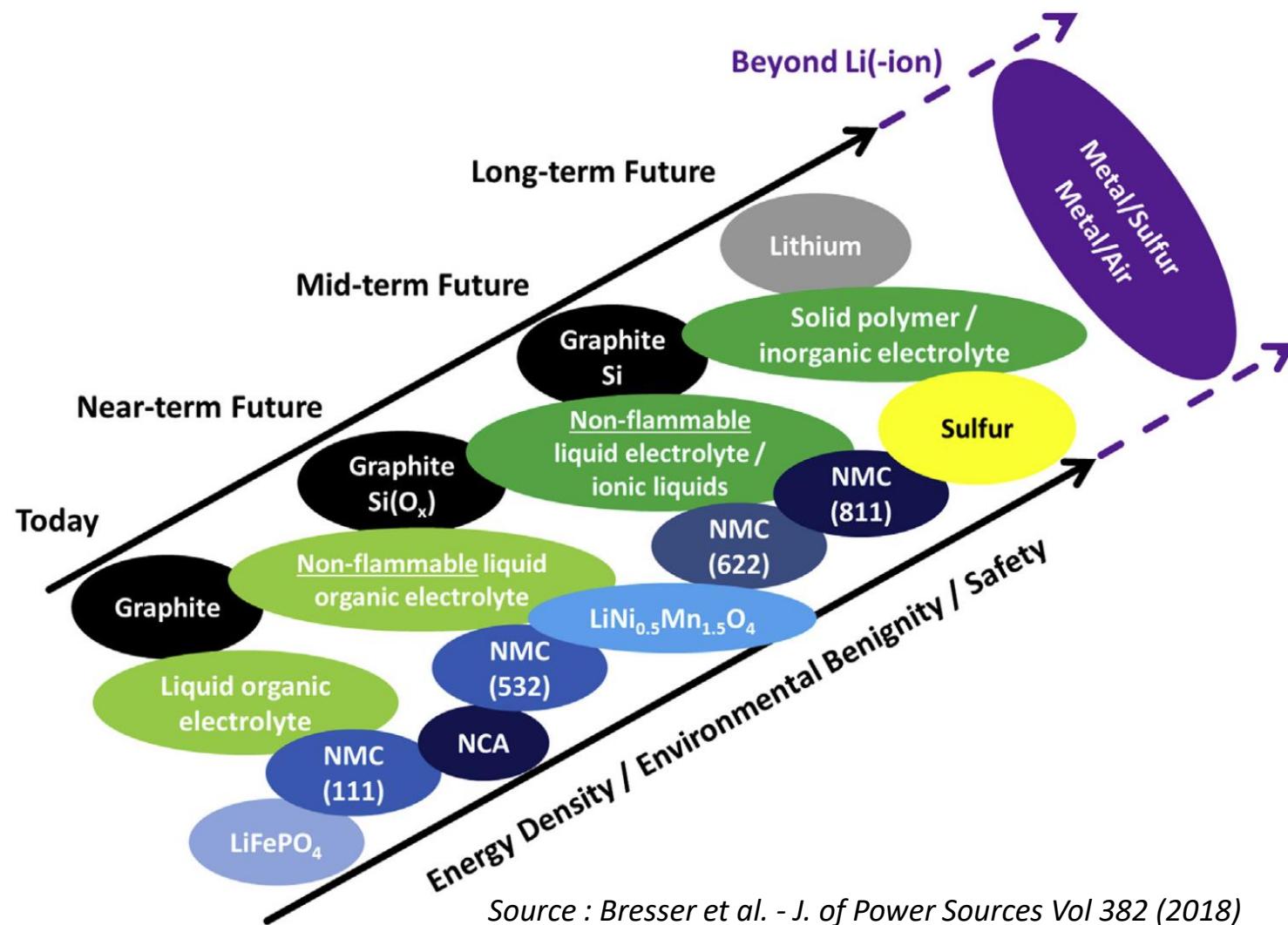
	Cellule A	Cellule B
Capacité	17 Ah	16 Ah
Tension nominale	3.6 V	3.6 V
Courant de décharge max en continu	35 A ( 2C)	80 A (5C)
Courant de décharge max 10 s	--	250 A (15C)
Courant de charge max en continu	35 A (2C)	80 A (5C)
Courant de charge max 10 s	--	250 A (15C)
Masse en g	430	450



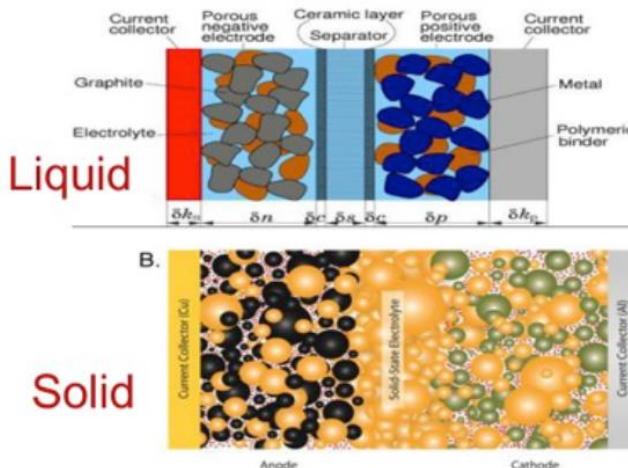


Source : Nikkei Electronics Asia - February 2010 - A New Era for Li-Ion Batteries <http://techon.nikkeibp.co.jp>

# Les matériaux des futures batteries Lithium



# Electrolytes solides pour batteries Lithium-ion



Liquid electrolyte	Solid electrolyte
good physical contact during cycling	could lose contact during cycling
endless interfacial reactions with Li	could be stable against Li
thermal runaway	could be much safer
operate below 4.45V Li <sup>+</sup> /Li	could operate above 4.45 V vs Li <sup>+</sup> /Li
need thermal release	thermal isolation

Source : Hong LI - Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications (ABAA10), Chicago 2017

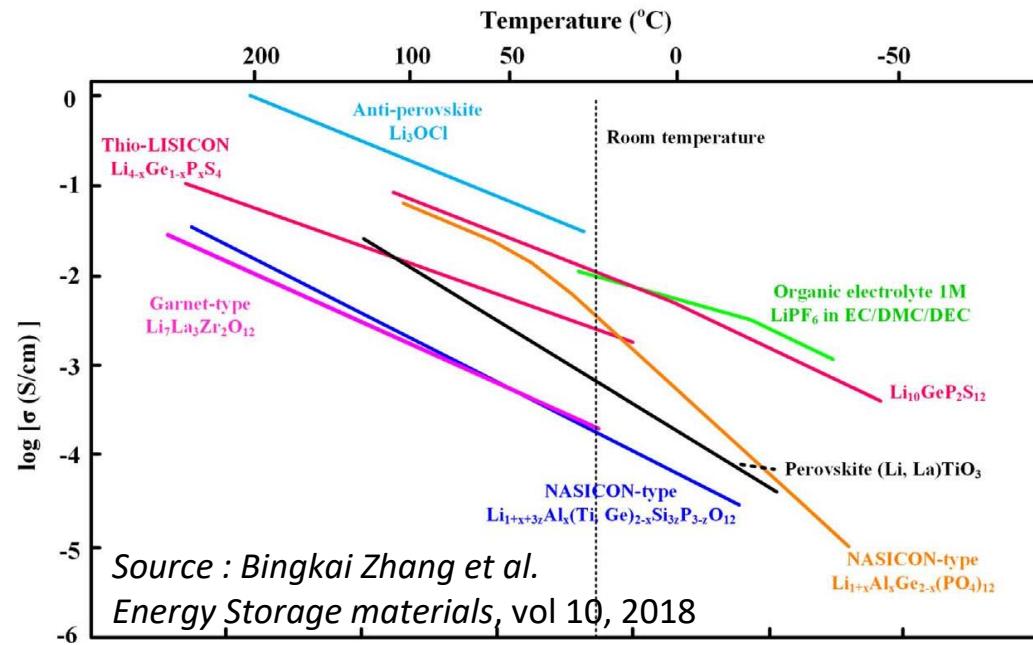


Plus d'énergie (tension ↑)

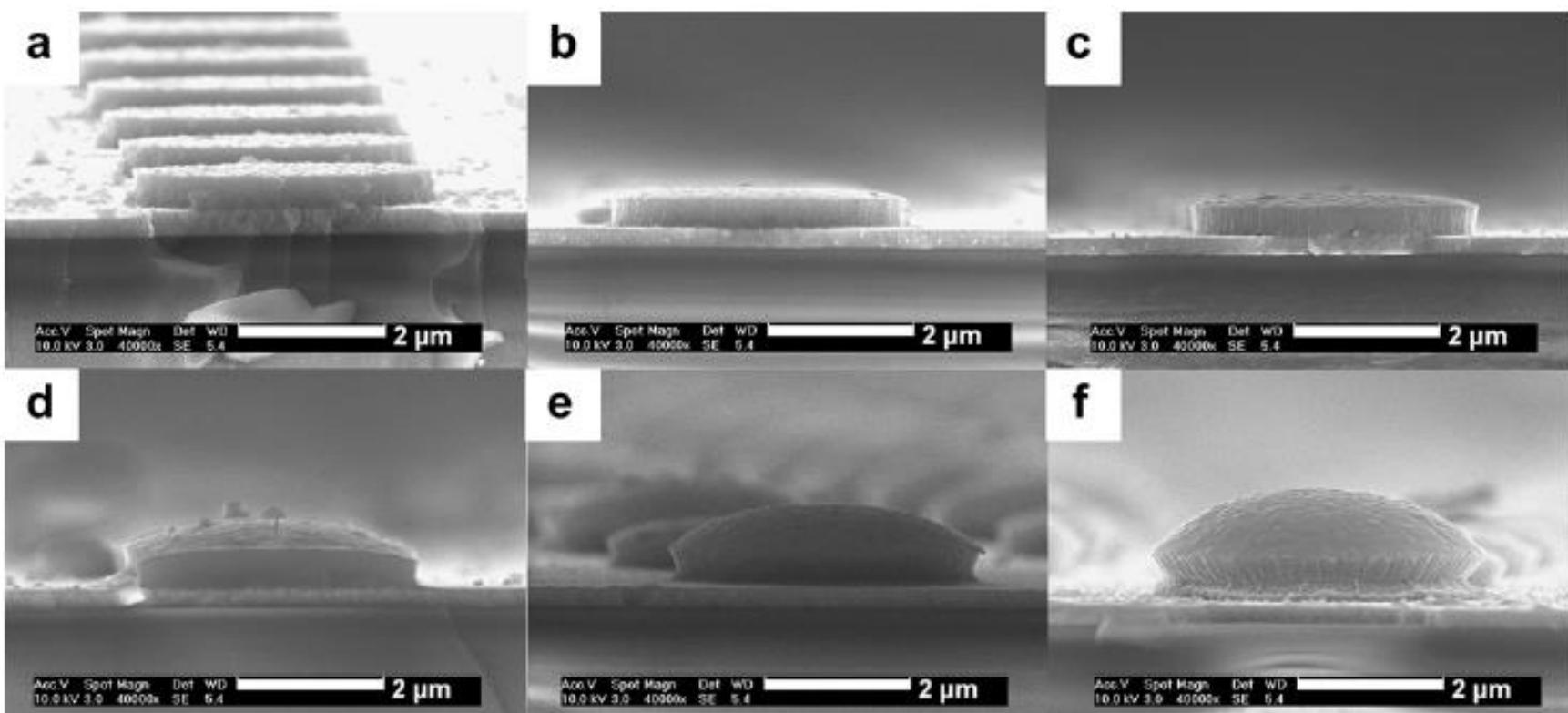
Plus de stabilité thermique



Besoin de baisser la température de fonctionnement

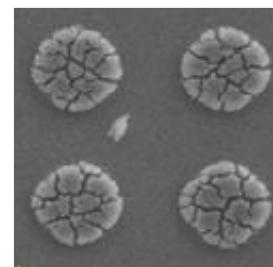
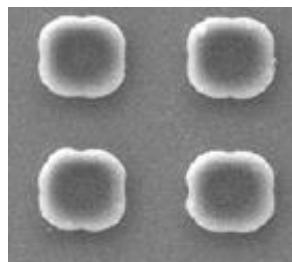


# Les effets mécaniques de l'insertion des ions lithium



Initial

Après 10 charges

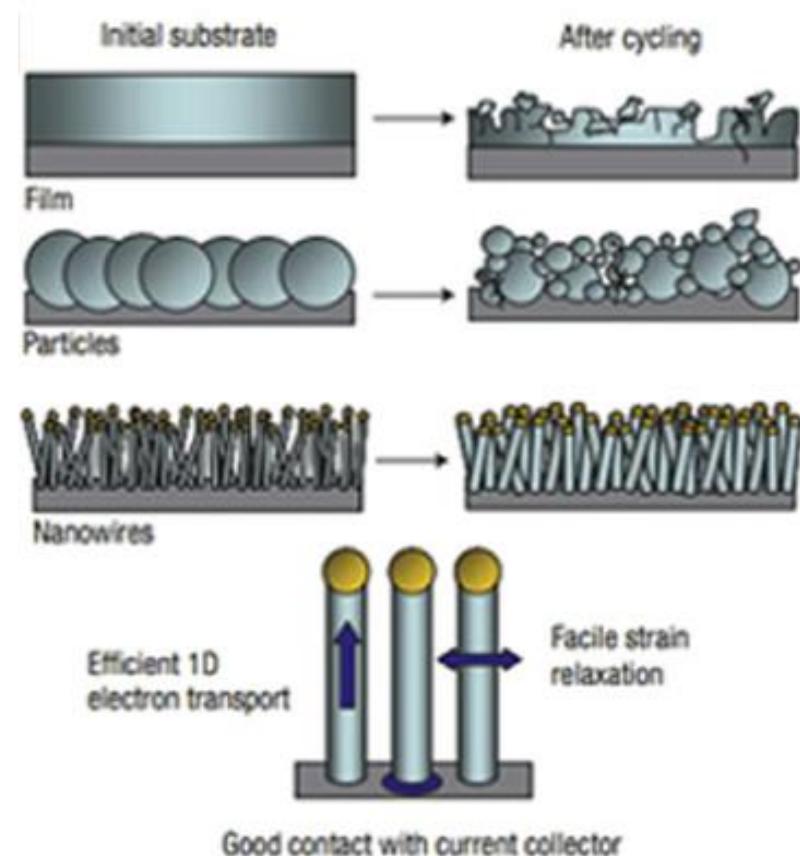


**Le silicium peut accepter 10 fois plus d'ions Li<sup>+</sup> que le carbone**

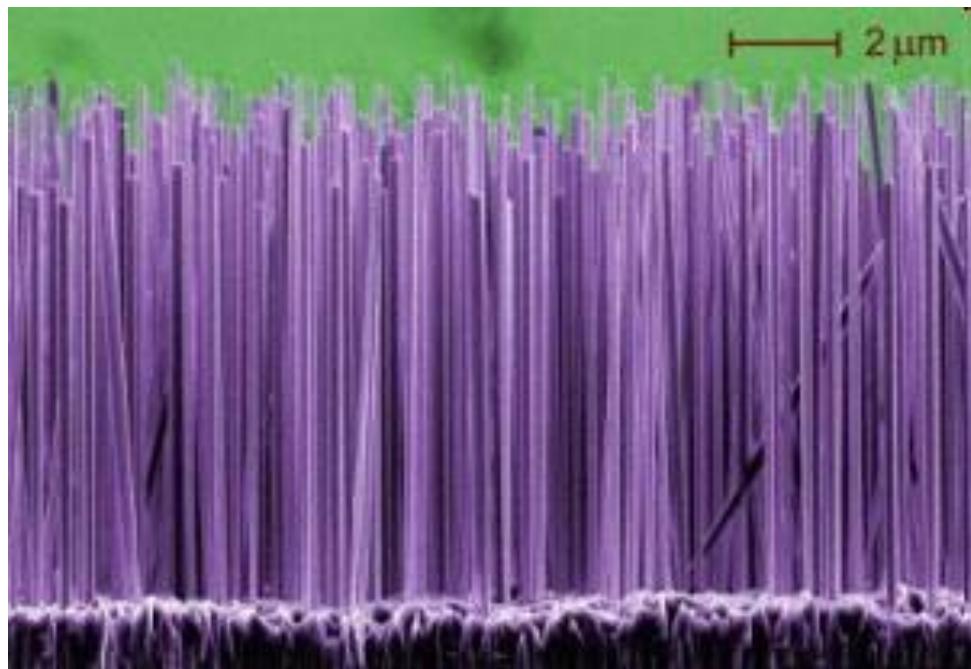
Source : Yu HE et al. Journal of Power Sources Vol 216, 2012

## Intérêt de la nano-structuration des matériaux :

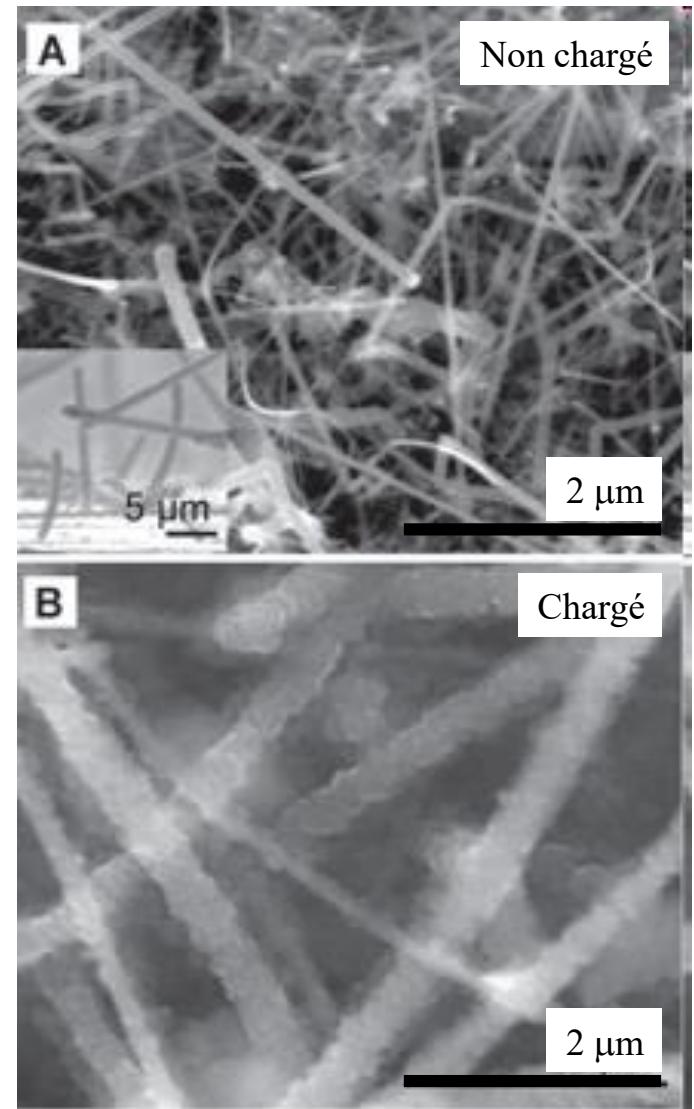
- **Augmentation de la surface spécifique (m<sup>2</sup>/kg) (gain en capacité)**
- **Réduction des distances de diffusion (gain en puissance)**
- **Limitation des contraintes mécaniques (gain en durée de vie)**



Source : Liang et al. – Journal of Power Sources vol 267 - 2014

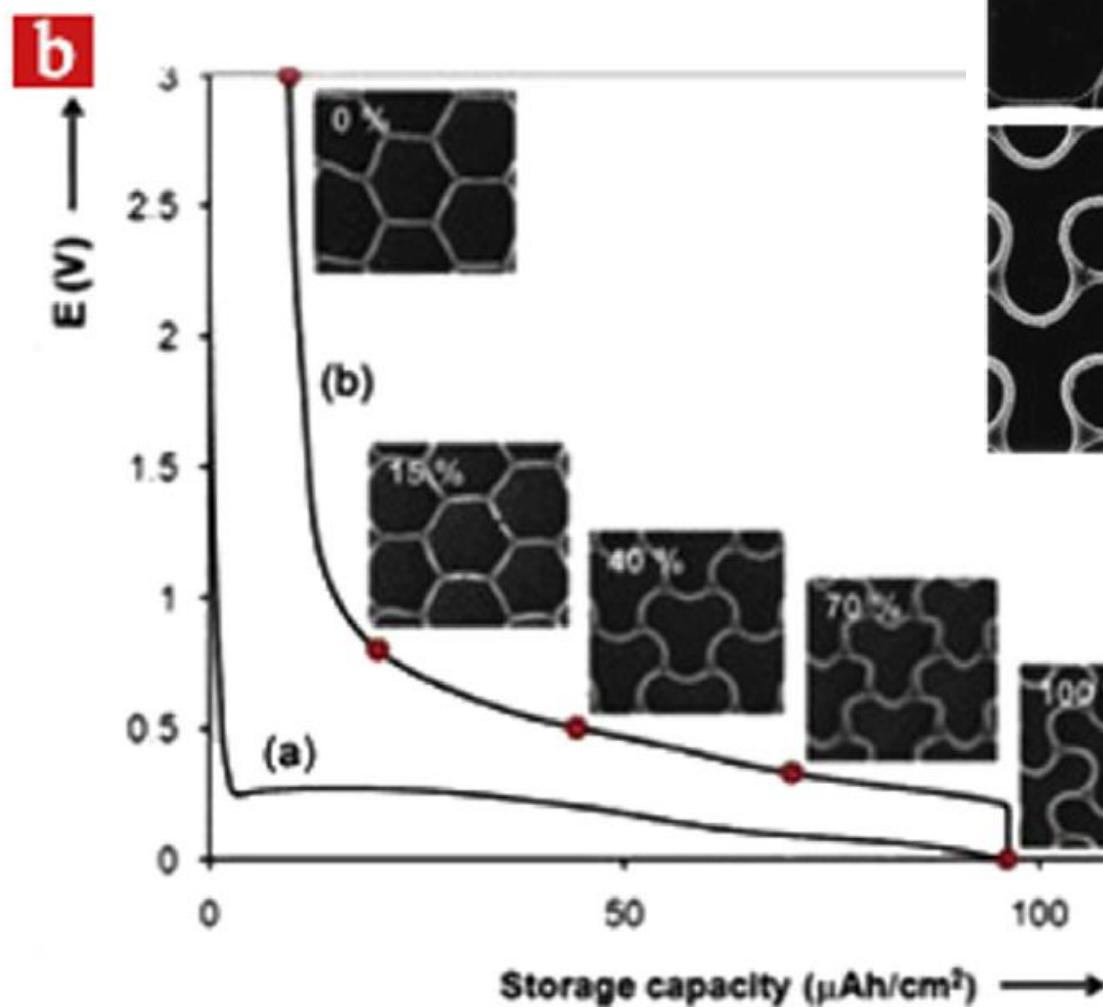


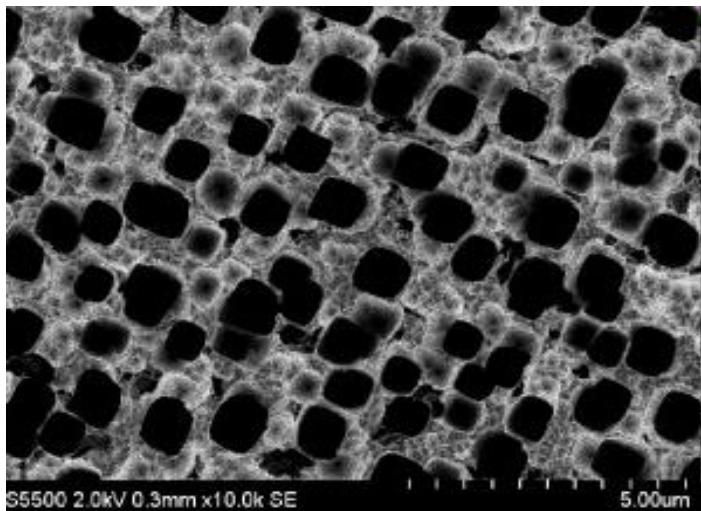
*Source : Amprius*



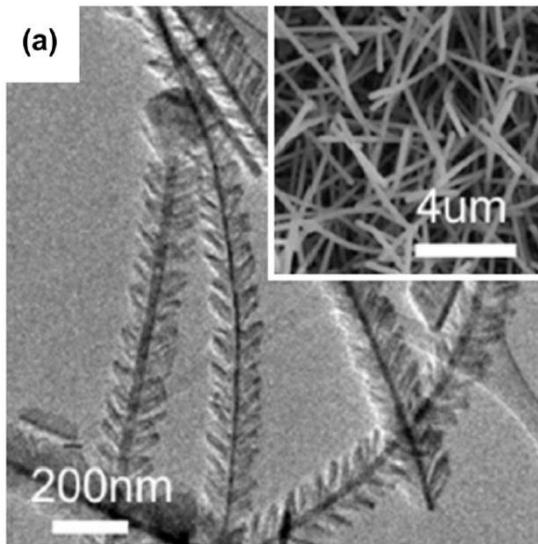
*Source : Yi Cui*

Source : Liang et al.  
*Journal of Power Sources* vol 267 - 2014

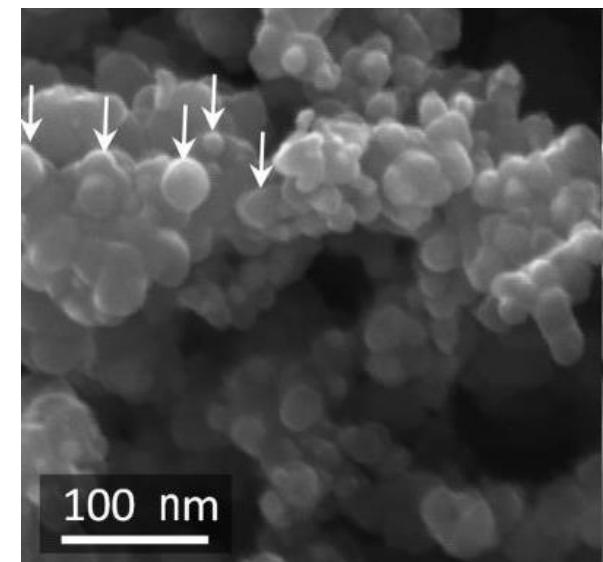
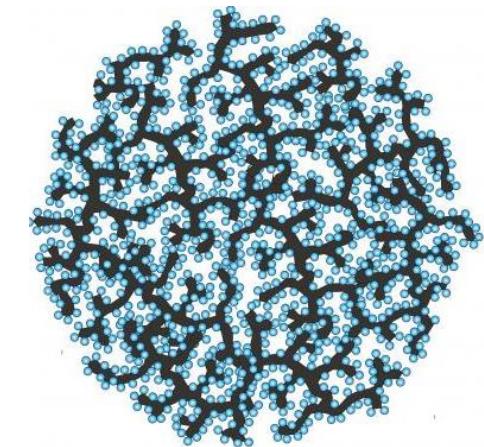




Source : Lockheed Martin and Rice University



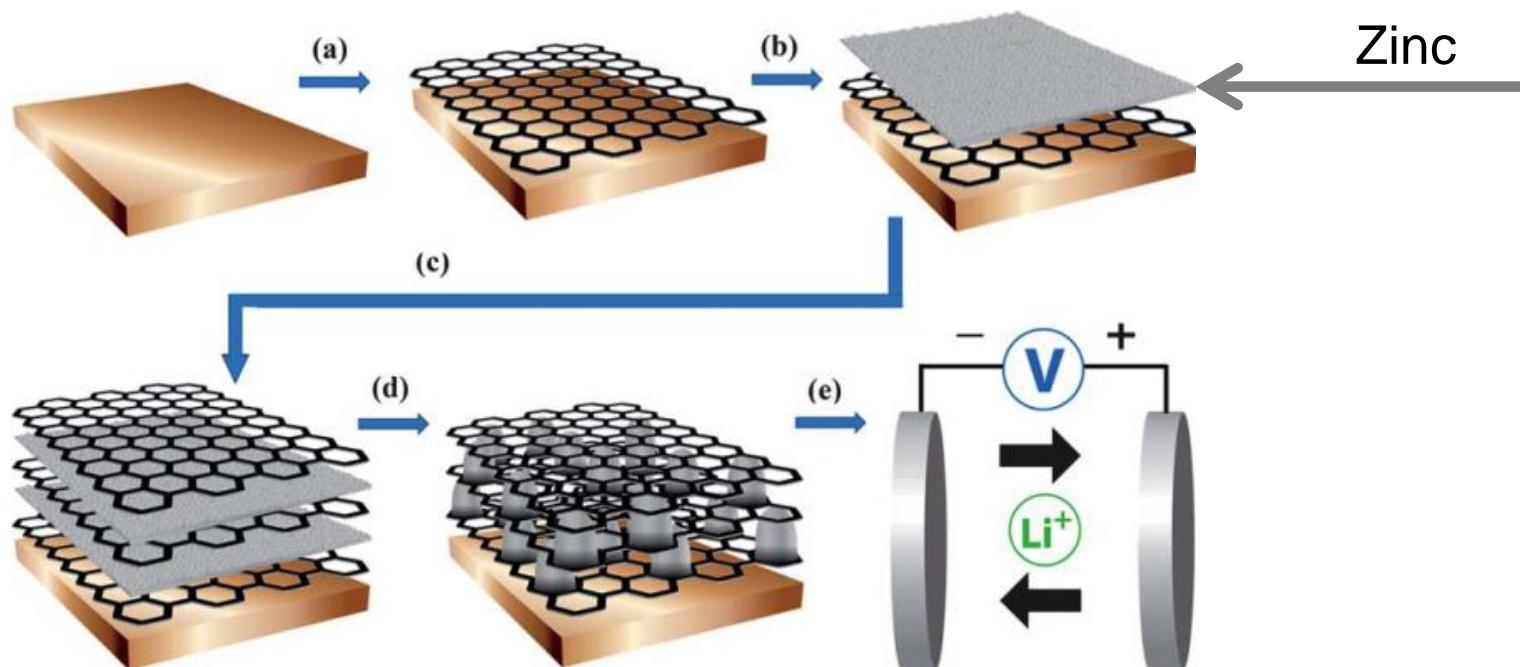
Source : Goriparti et al.  
Journal of Power Sources  
Vol 257 - 2014



Source : A. Magasinski et al.  
Nature Materials, Volume: 9 (2010)

**Graphène : feuille mono-couche d'atome de carbone**

*Découvert en 2004 par A. Geim et K. Novoselov (Prix Nobel 2010)*

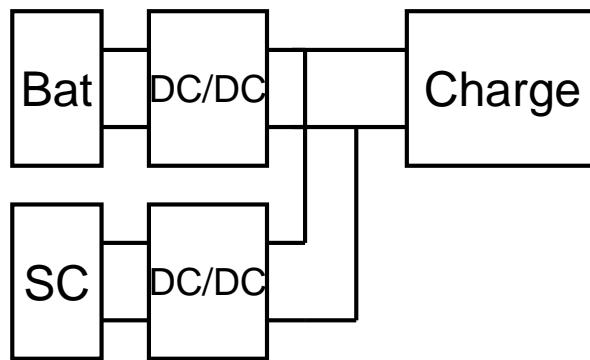


Source : Lawrence Berkeley National Laboratory (2011)

**Densité énergétique atteinte en laboratoire : 500 Wh/kg  
(actuellement Lithium-ion < 200 Wh/kg)**

Les supercondensateurs peuvent être utilisés lorsque la puissance électrique est trop élevée pour des batteries.

Exemples : freinage des véhicules, assistance au démarrage, charge rapide,...



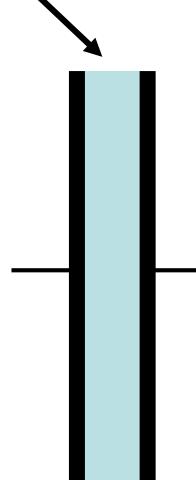
De nombreuses applications ont mis en œuvre des associations de batteries et de supercondensateurs en parallèle.

Le coût des convertisseurs et l'augmentation des performances en puissance des batteries ont rendu ces associations moins compétitives.

Mais la recherche de très fortes puissances et la durée de vie très élevée des supercondensateurs ont maintenu un intérêt pour des associations plus « intimes ».

## Condensateur diélectrique

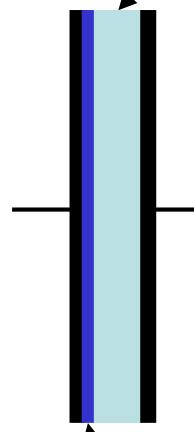
Diélectrique  
(épaisseur  $e$ )



$$\text{Capacité} = \epsilon_0 S/e$$

## Condensateur électrochimique ou électrolytique

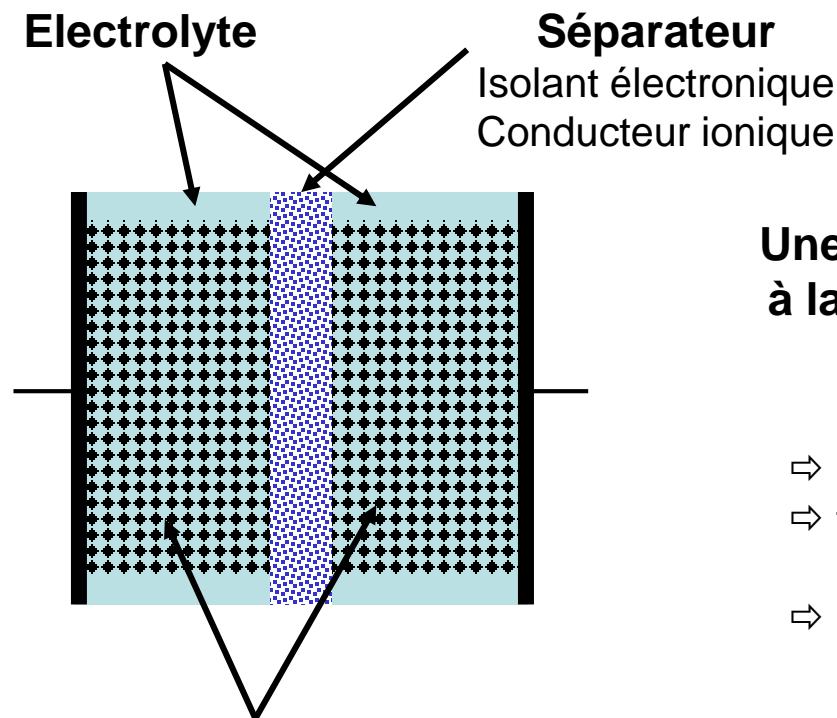
Electrolyte



Double couche  
crée par une électrolyse  
épaisseur très faible ( $\approx 1 \text{ nm}$ )

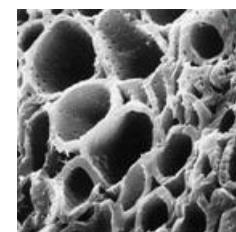
⇒ si  $e$  diminue  
la capacité augmente

Mais polarisation  
du composant !!



**Une double couche se forme à la surface du charbon actif**

- ⇒ épaisseur e très faible
- ⇒ très grande surface S
- ⇒ Capacité =  $\epsilon_0 S/e$  de **très forte valeur**



Surface spécifique > 1000 m<sup>2</sup> / g

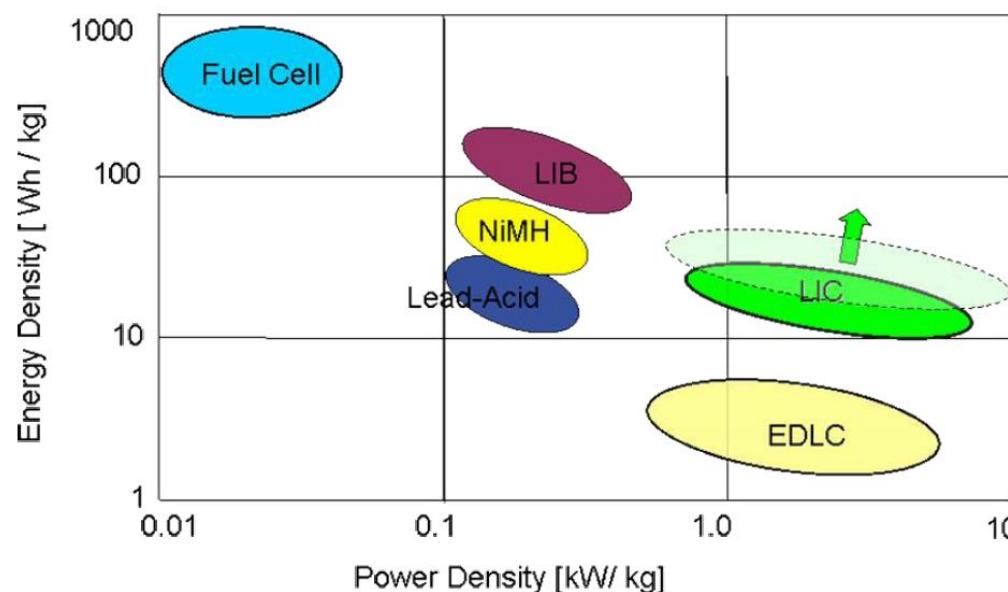
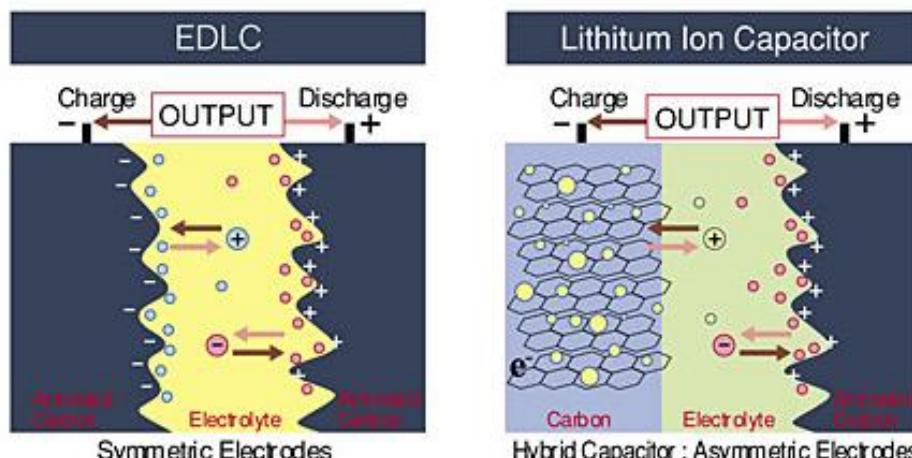
Specifications	HC Series	BC Series	K2 Series
			
<b>Capacitance (F)</b>	1 - 150	310 - 350	650 – 3,400
<b>Voltage (V DC)</b>	2.3 - 2.7	2.7	2.7 - 2.85
<b>ESR<sub>DC</sub> (mohm)</b>	14 - 700	2.2 - 3.2	0.28 - 0.8
<b>Leakage current (mA)</b>	0.006 - 0.500	0.3 - 0.45	1.5 – 18
<b>E<sub>max</sub> (Wh/kg)</b>	0.7 - 4.7	5.2 - 5.9	4.1 – 7.4
<b>P<sub>max</sub> (W/kg)</b>	2,400 - 7,000	9,500 - 14,000	12,000- 14,000



*Rappel condensateur électrolytique*

**Capacité : 0.1 ~ 1 F max**  
**Tension : 10 ~ 500 V DC**  
**Energie : 0.1 Wh/kg max**

# Un supercondensateur hybride : Lithium Ion Capacitor



Source : JM Energy

	Yunasko	General Capacitor
Capacité (F)	1700	3000
Umax (V)	2.7	3.8
Umin (V)	1.35	2.2
Résistance (mOhm)	1	2
I max pic (A)	300	150
I max continu (A)	200	-
P (kW/kg)	4	6.4
E (Wh/kg)	37	17
Température	- 40°C / + 60°C	- 40°C / + 65°C
Durée de vie	10 000	100 000
Masse (g)	85	250



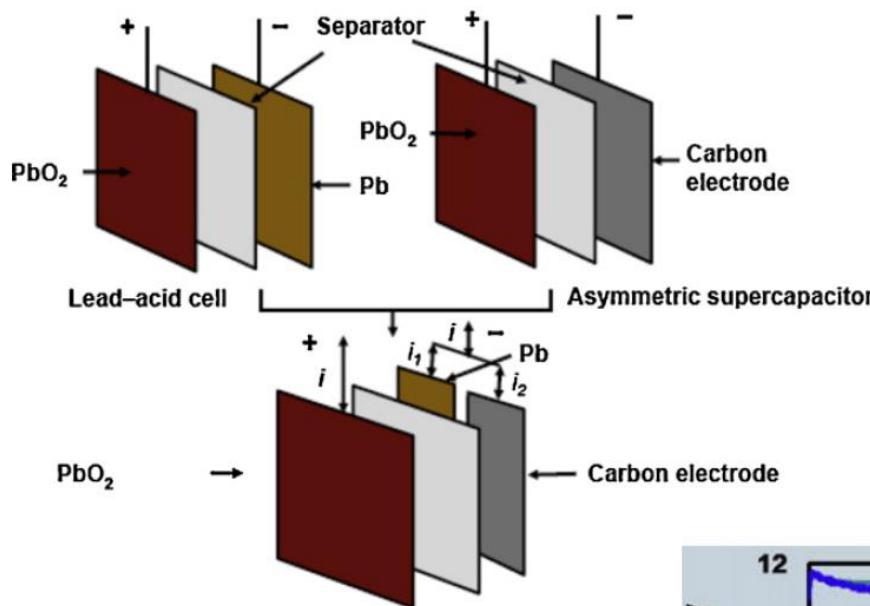
Source : Yunasko



Source : General Capacitor

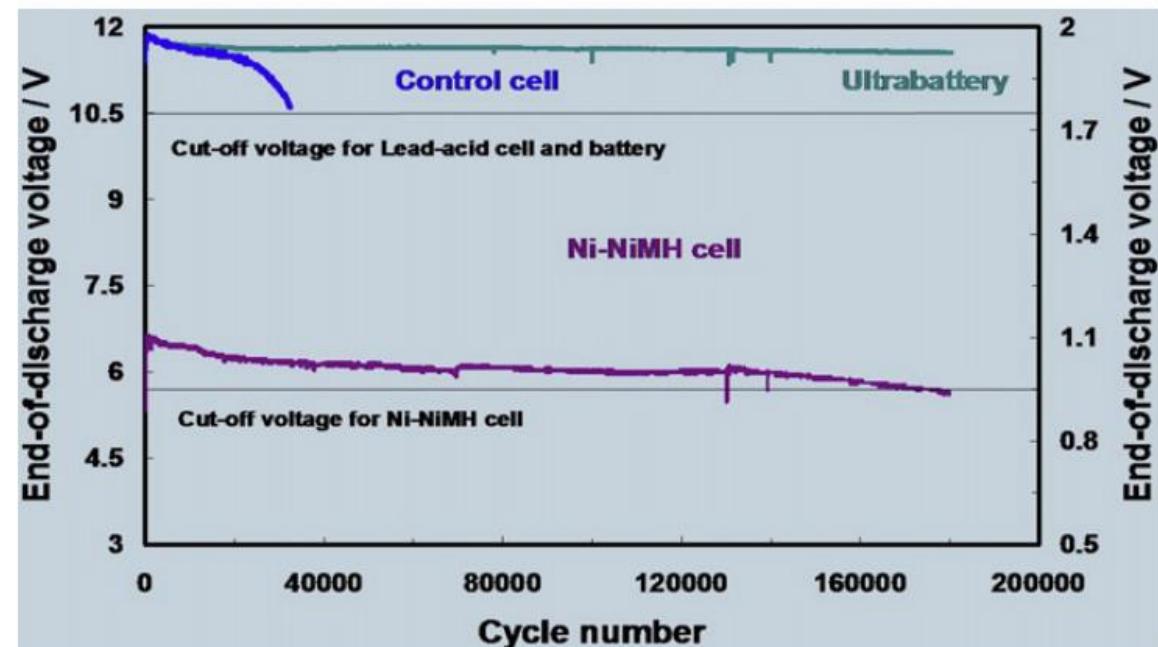
**Rappel : batteries lithium-ion 150 Wh/kg – 2 kW/kg  
supercondensateur 5 Wh/kg – 15 kW/kg**

# Une batterie hybride : l'ultra-batterie



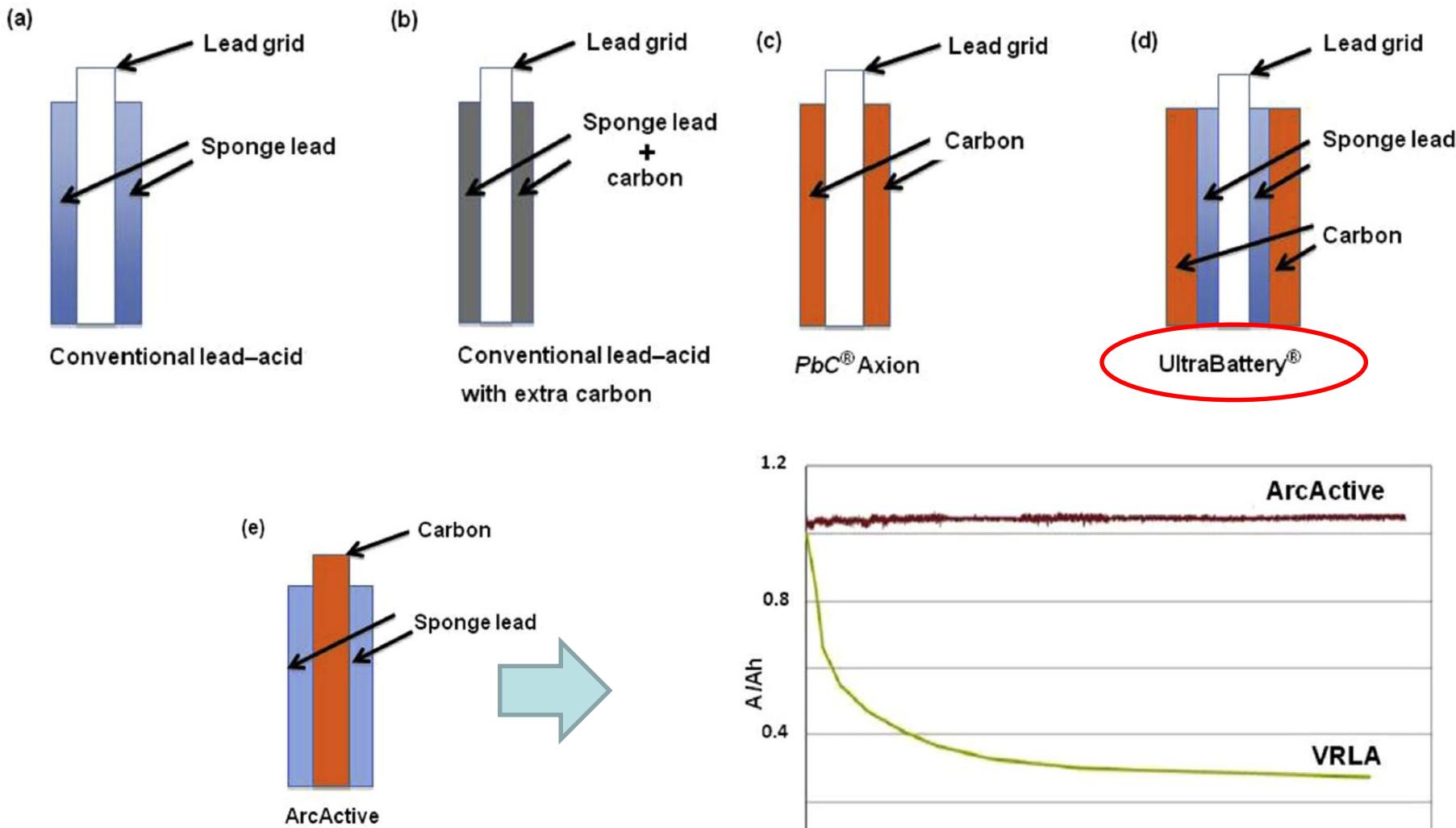
L'ultra-batterie au plomb ... ou le mariage (réussi ?) d'une batterie au plomb et d'un supercondensateur pour capitaliser les avantages des 2 composants sans aucun convertisseur supplémentaire.

Source : A. Cooper et al. / Journal of Power Sources 188 (2009)



Une durée de vie dans une application « véhicule hybride » aussi longue qu'une batterie NiMH

# Batterie « plomb » enrichie au carbone



Source : P.T. Moseley et al. / Journal of Power Sources 295 (2015)

- Le sodium est abondant (2,6 % de sodium dans la croûte terrestre, contre 0,06 % de lithium)
- Recharge 10 fois plus rapide que pour les batteries lithium-ion
- Densité énergétique : 90 à 140 Wh/kg
- Durée de vie 4000 cycles
- Pas d'emballement thermique



**TIAMAT**

France, CNRS, CEA

**FARADION**  
Advanced Energy Storage Solutions

UK, Univ. Oxford



# La caractérisation des batteries

Pourquoi ?

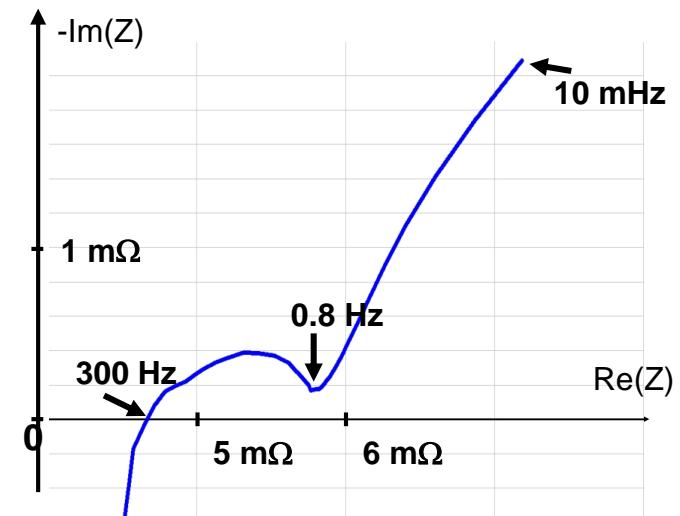
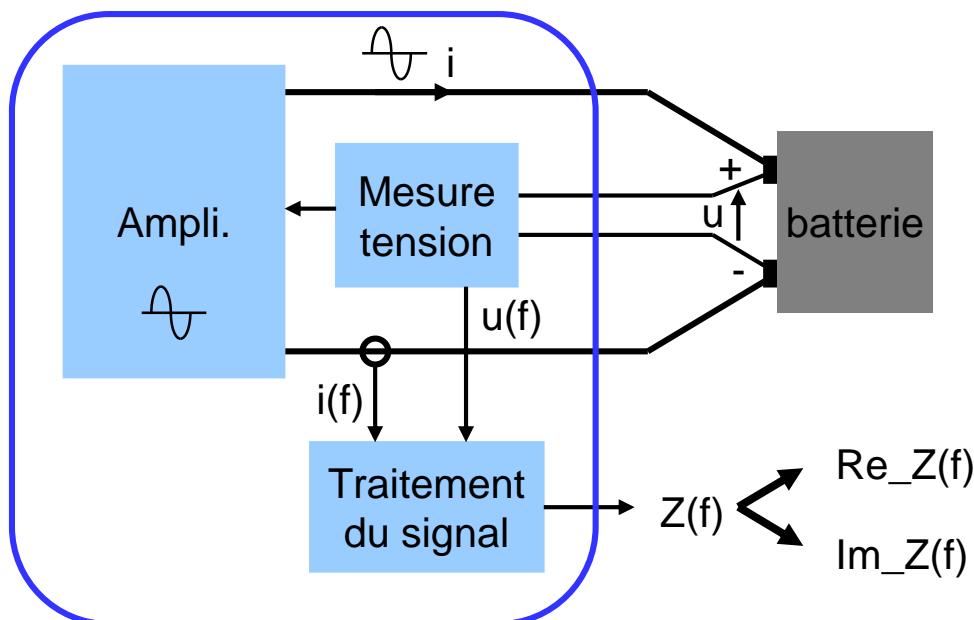
- Comparer des cellules entre elles
- Caractériser l'évolution d'une cellule
- Déetecter une cellule défectueuse
- Renseigner un modèle équivalent
- ...

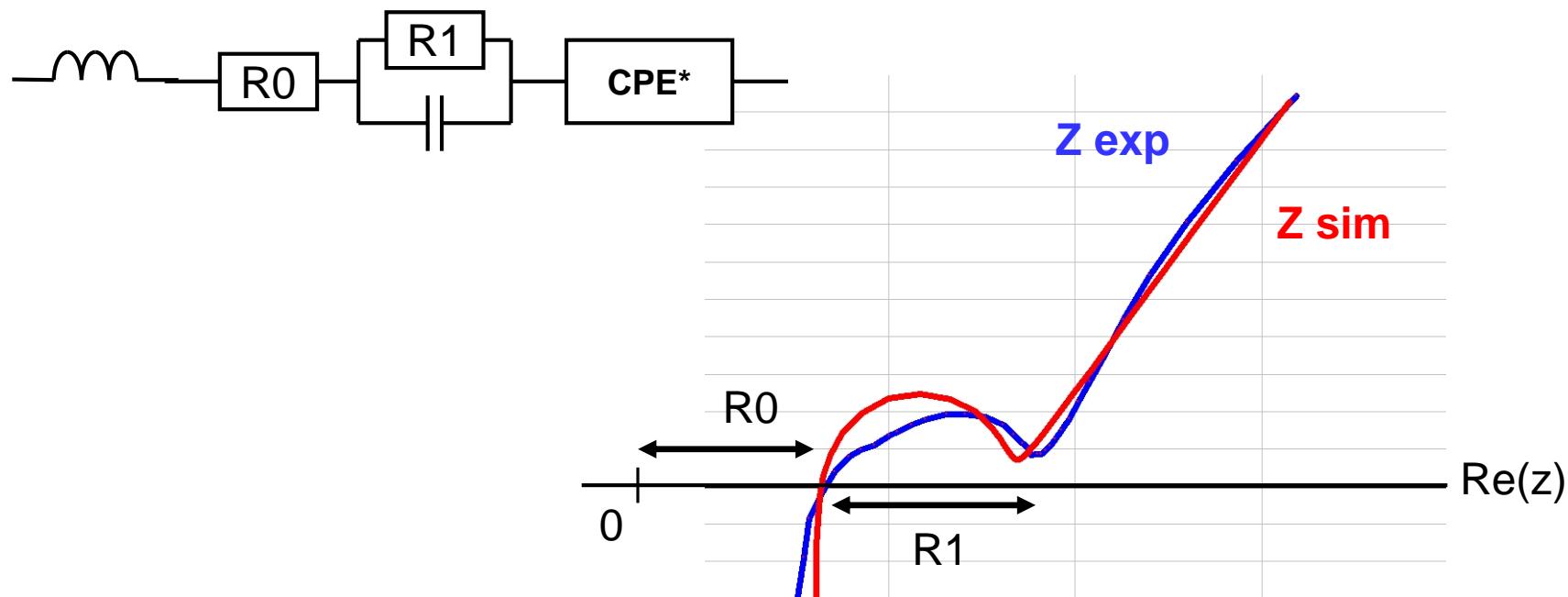
Comment ?

- Caractérisation fréquentielle
- Caractérisation temporelle

Un exemple de caractérisation standardisée : FreedomCAR

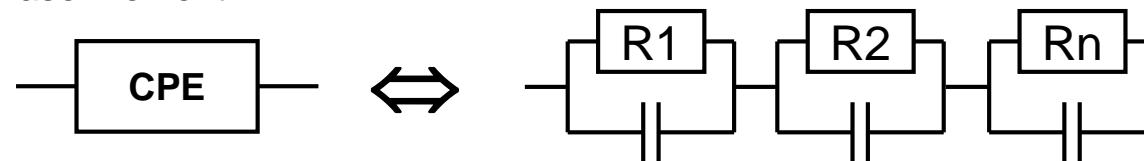
Un spectromètre d'impédance (EIS Electrochemical Impedance Spectroscopy) permet de mesurer l'impédance d'une batterie dans une plage de fréquences.



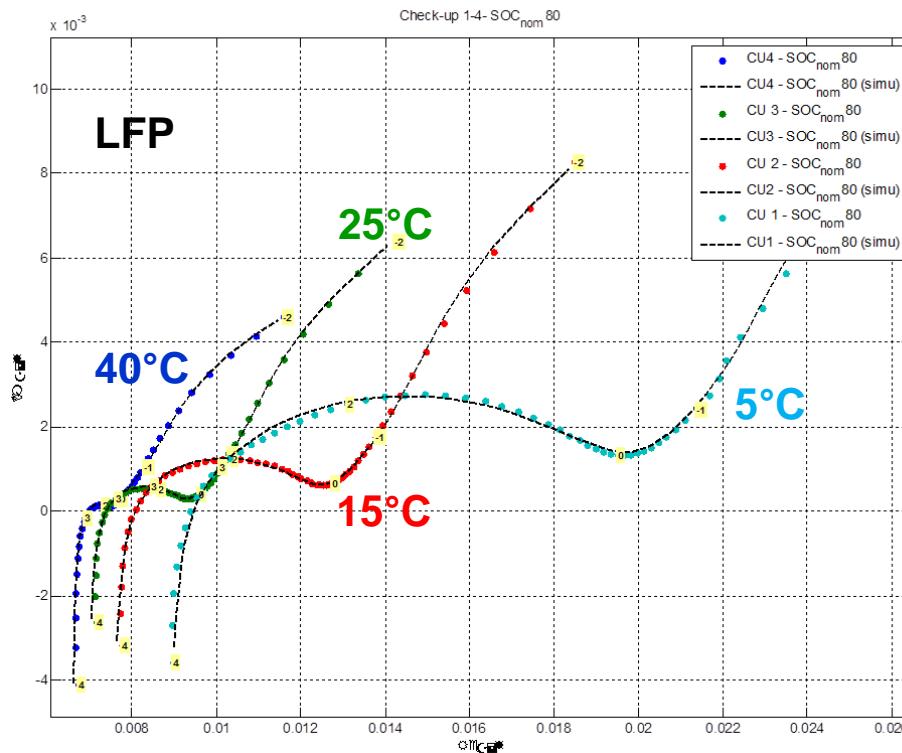
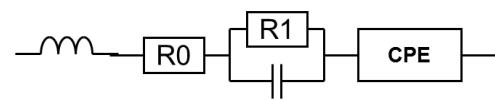


Le spectre d'impédance permet de visualiser certaines caractéristiques de la batterie

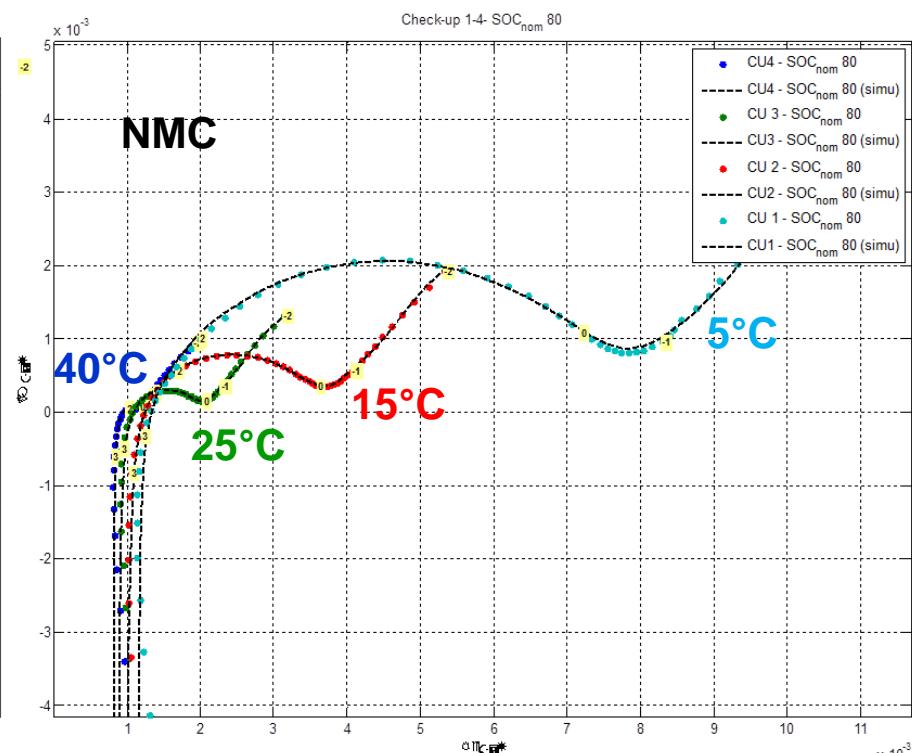
\* CPE = Constant Phase Element



# Influence de la température sur la réponse fréquentielle



si  $\Theta \searrow$  alors R0 et R1  $\nearrow$



si  $\Theta \searrow$  alors R0  $\approx$  cte et R1  $\nearrow$

- La température influence les mesures de spectroscopie
- Cette influence dépend de la chimie de la batterie

## Limitations de la méthode :

- **Caractérisation à faible niveau de courant**

⇒ ne représente pas le comportement à fort niveau de courant.

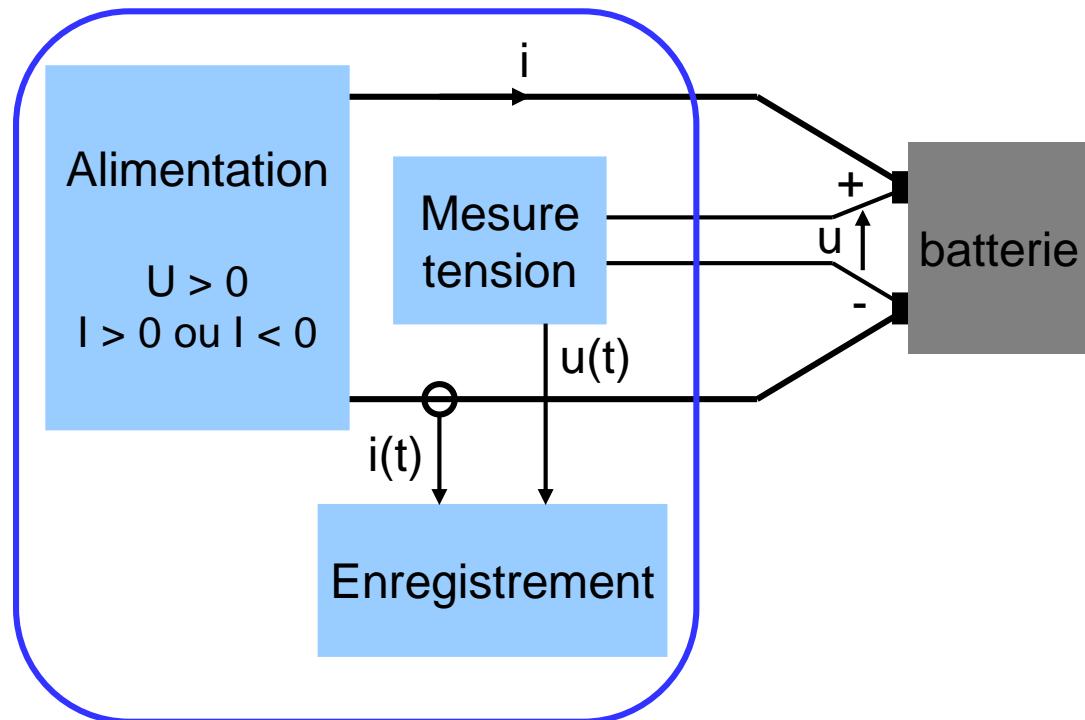
Les mesures EIS à fort niveau posent les problèmes suivants :

- dérives du SOC à basse fréquence ( $< 10 \text{ mHz}$ )
- non linéarité éventuelle des paramètres  
(un circuit équivalent est souvent dit "approximation petits signaux")

- **Mesures à très faible fréquence ( $< 1\text{mHz}$ )**

- durée des mesures  
à  $1\text{mHz}$ , une période vaut  $1000\text{s} = 16 \text{ min}$
- stabilité de la mesure (bruit, dérive de SOC, ...)

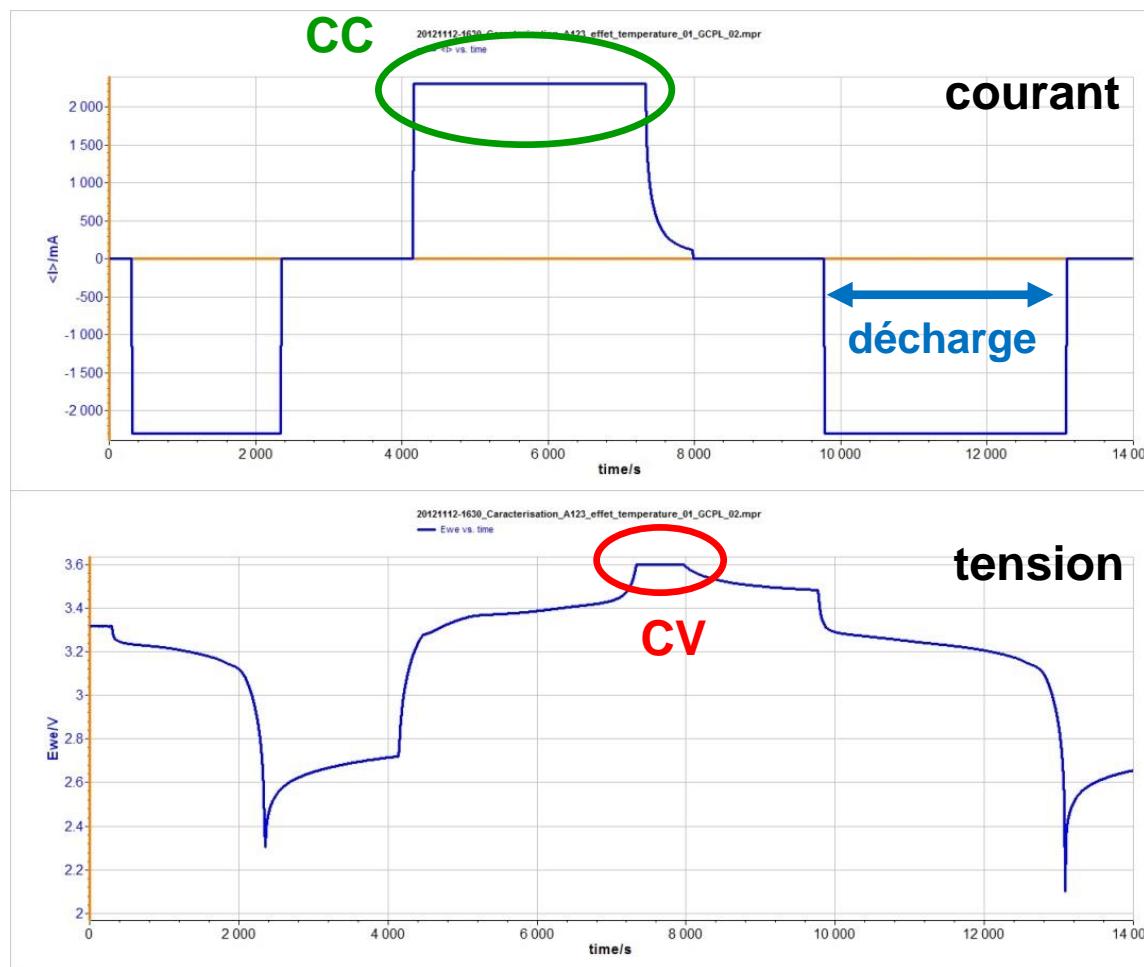
**Mais les mesures EIS sont un outil puissant qui donne des informations précieuses sur la batterie et les mécanismes internes.**



Une alimentation “2 quadrants” permet de soumettre la batterie à :

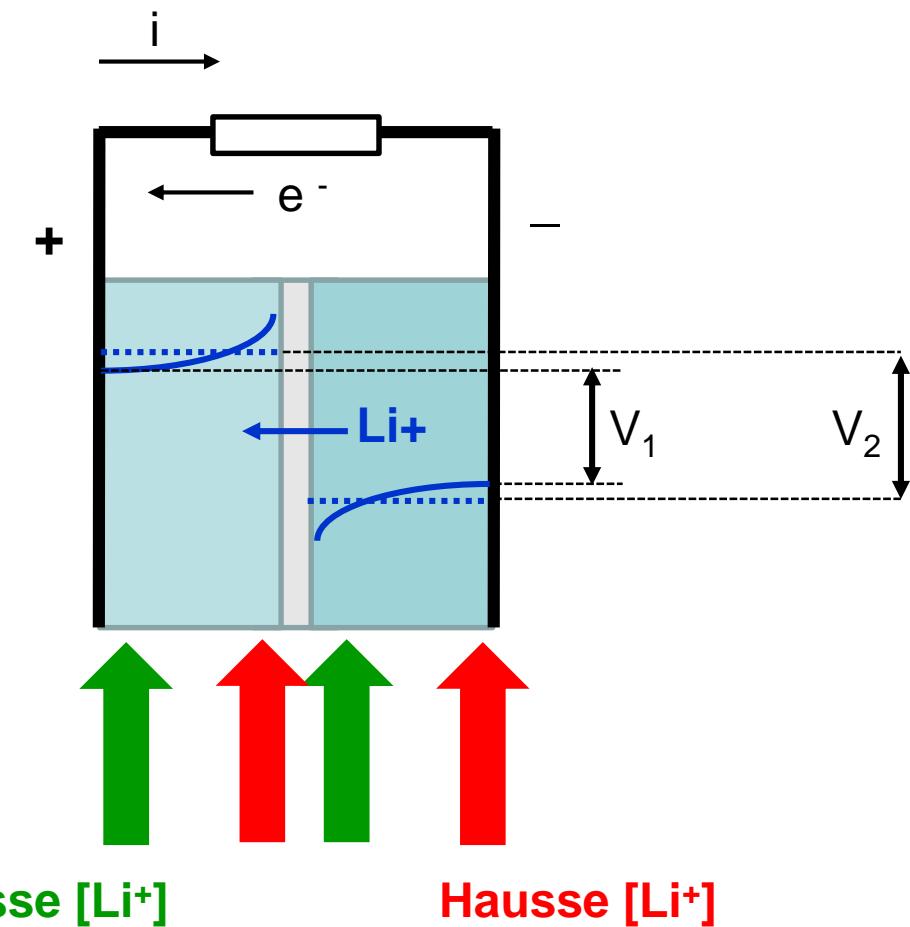
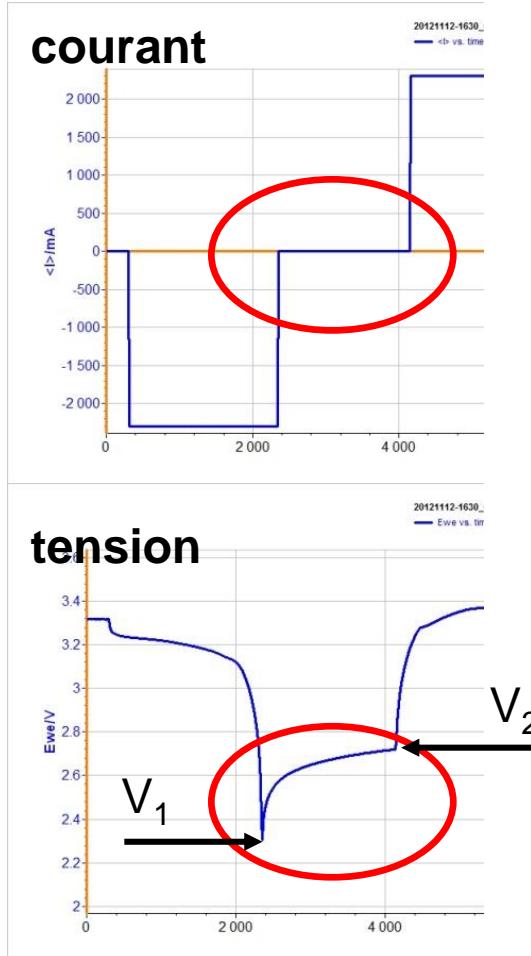
- des charges et des décharges DC
- des impulsions de courant
- un profil de courant

# Charge – décharge CCCV d'une batterie Li-ion

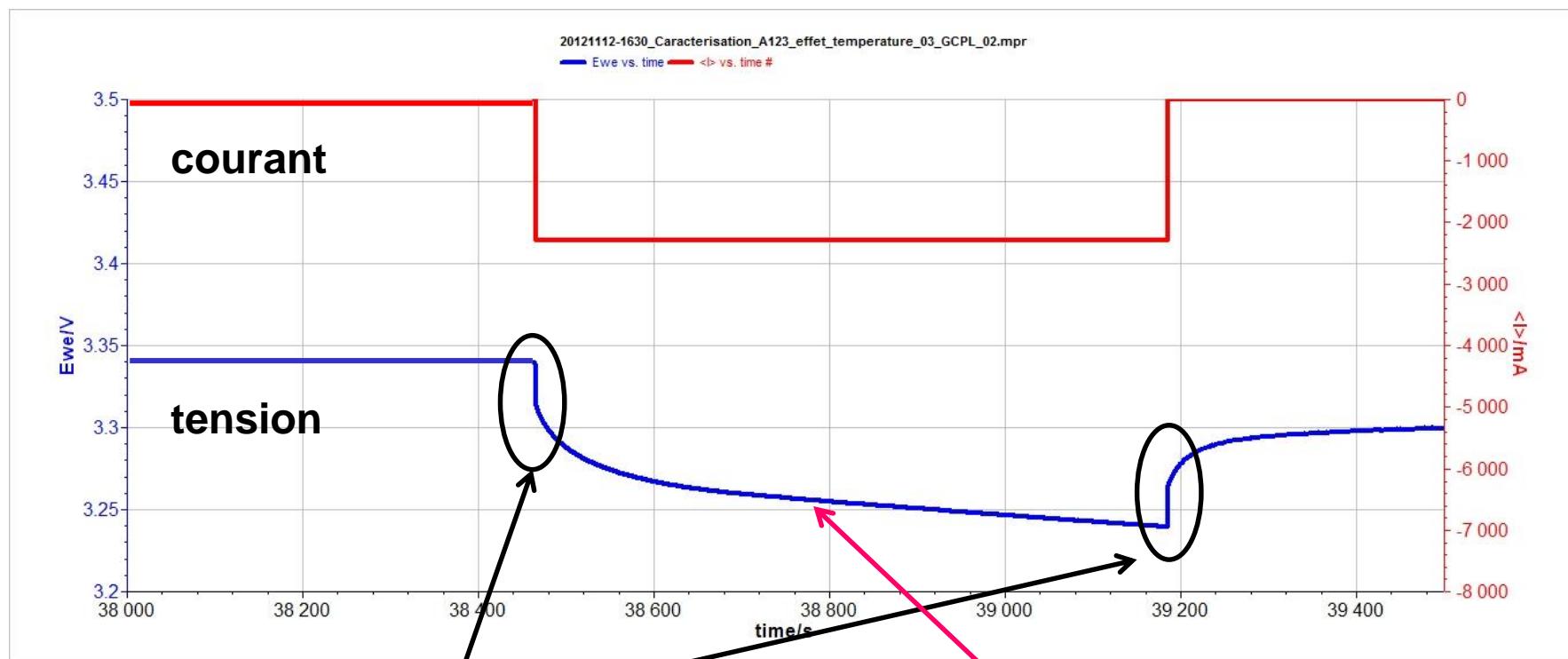


- Vérification des grandeurs courant – tension
  - Rodage – mise en condition
  - Protocole de charge CC-CV de la batterie
- Mesure de la capacité (intégrale des Ah pendant la décharge)

# Relaxation de la tension après une décharge

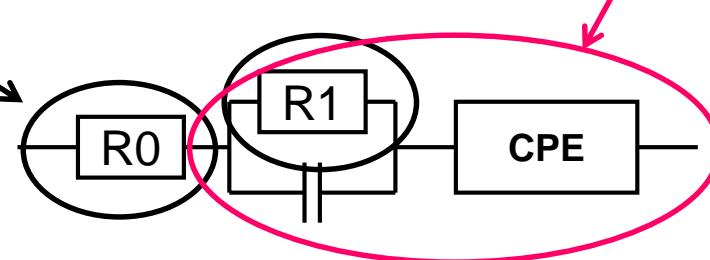


## Réponse temporelle impulsionnelle d'une batterie

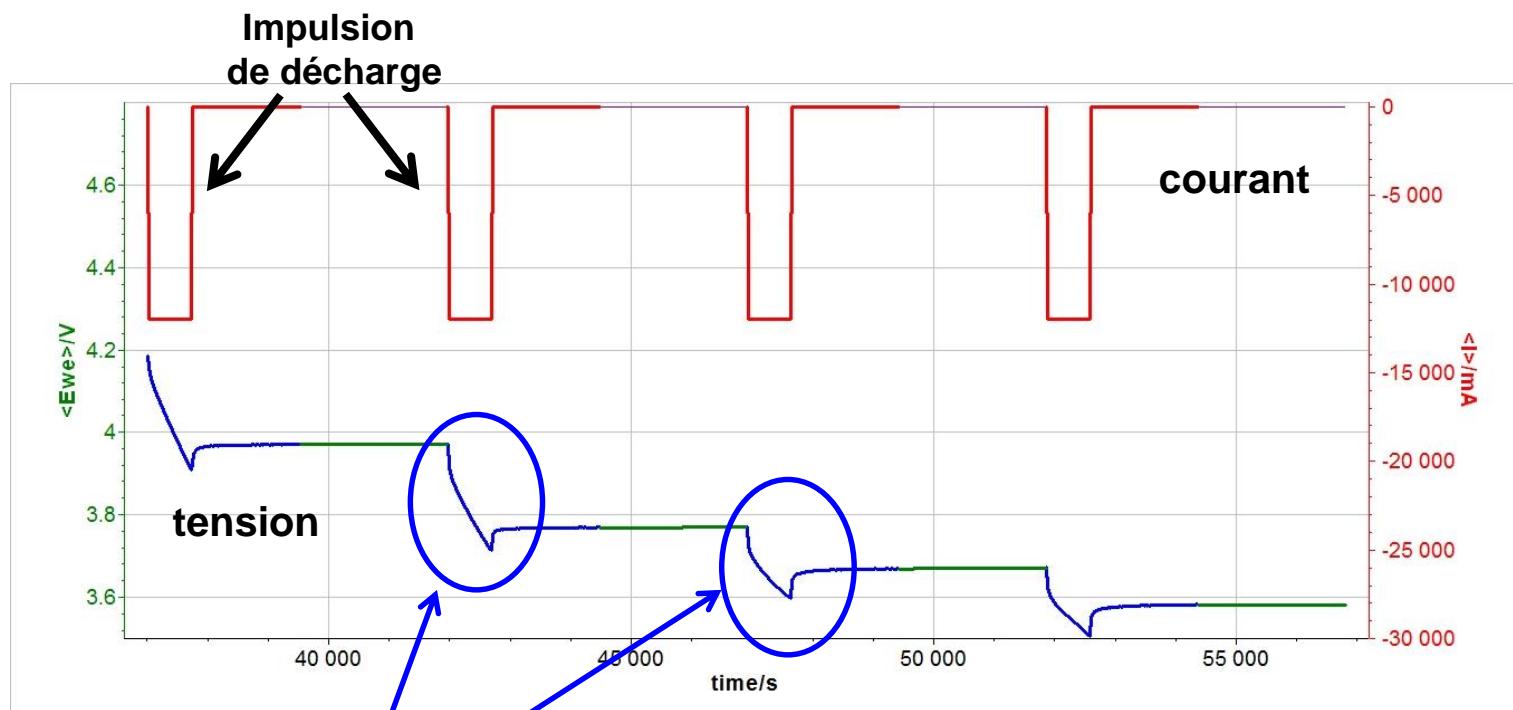


## Comportement ohmique (saut de tension)

## Comportement « capacitatif »



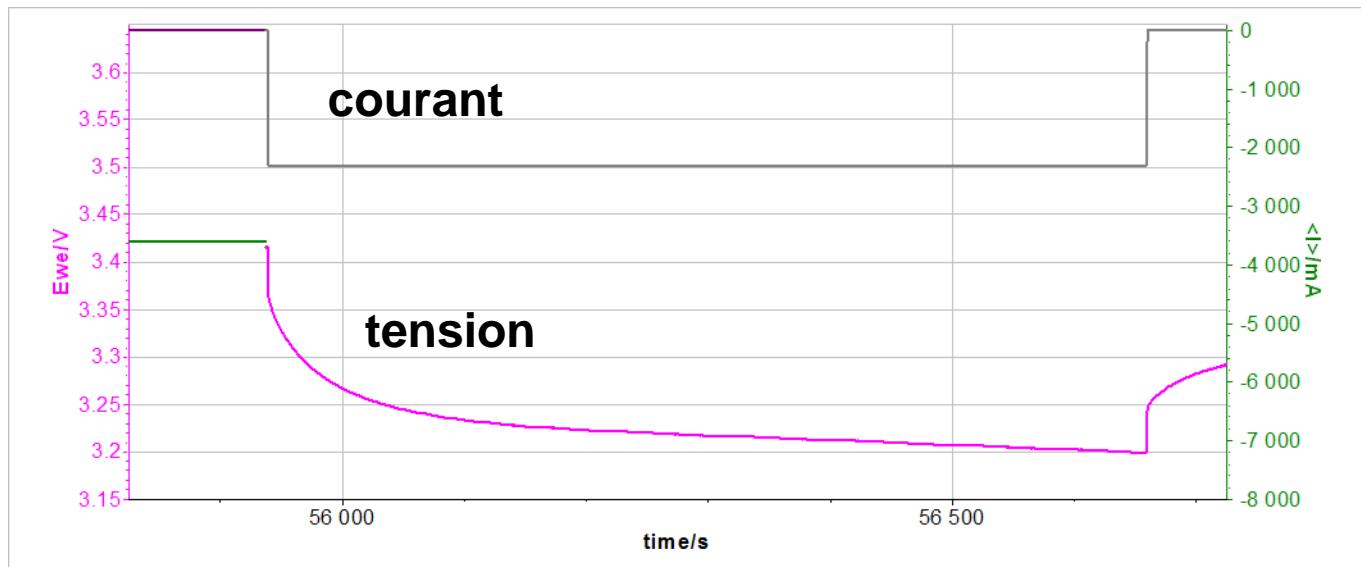
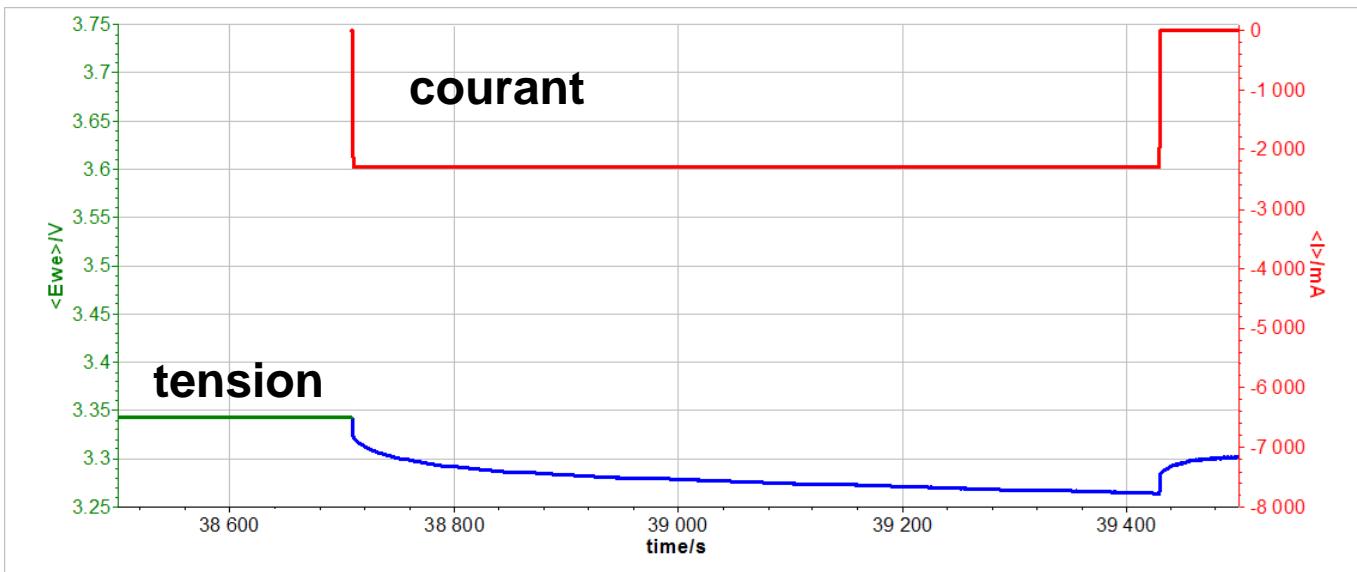
# Influence de l'état de charge sur la caractérisation



La réponse dépend  
de l'état de charge  
de la batterie

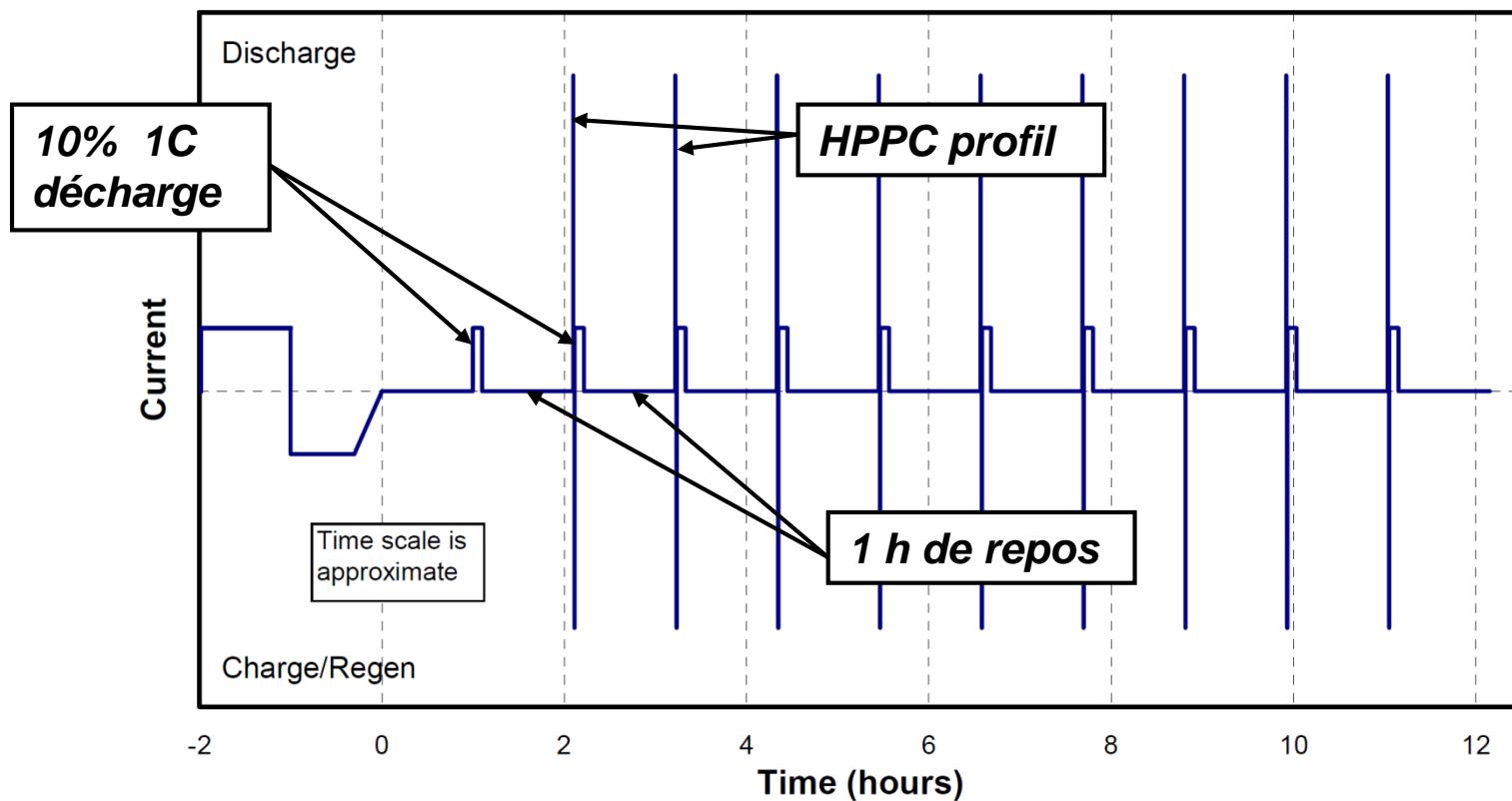
Chaque palier de tension correspond à  
un état de charge différent

# Influence de la température sur la réponse temporelle

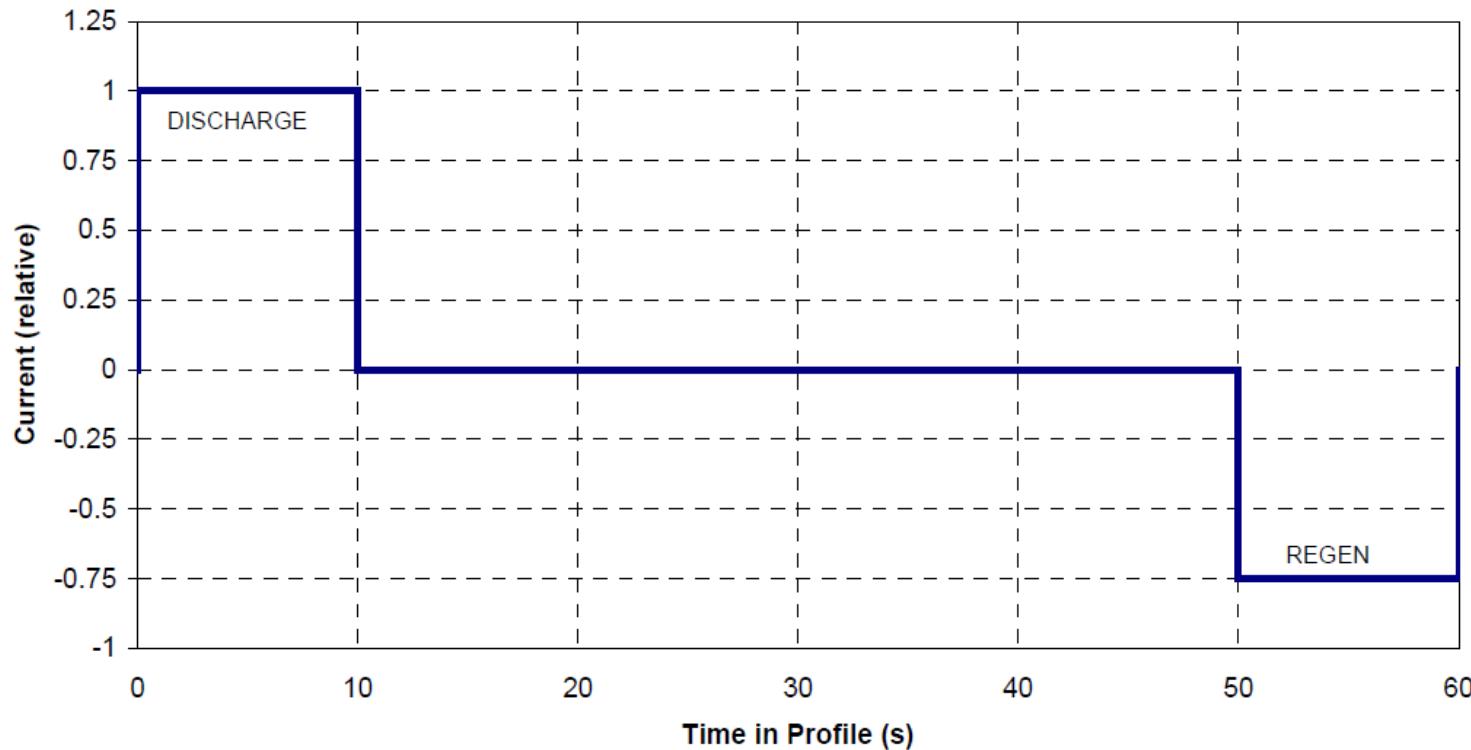


## Reference Performance Test (RPT)

- Mesure de la capacité (Ah) par une décharge à 1C
- profil dynamique HPPC : Hybrid Pulse Power Characterization Test



**Profil HPPC = 1 impulsion de décharge + 1 impulsion de charge**



- ⇒ HPPC faible courant      25% de Imax (mais au moins 5C)
- ⇒ HPPC fort courant      75% de Imax

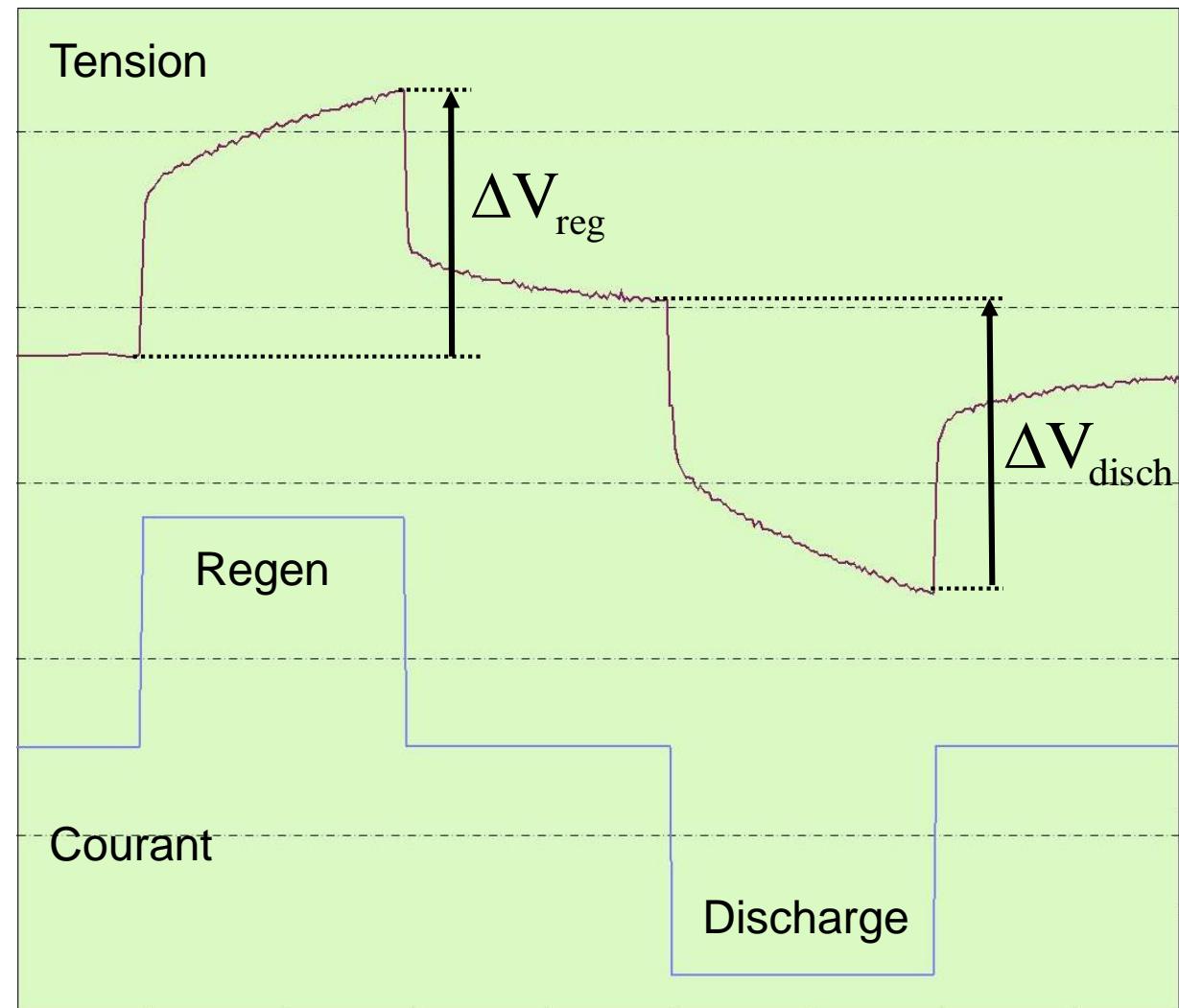
**Exploitation du profil HPPC : calcul de la “résistance” équivalente à 10s**

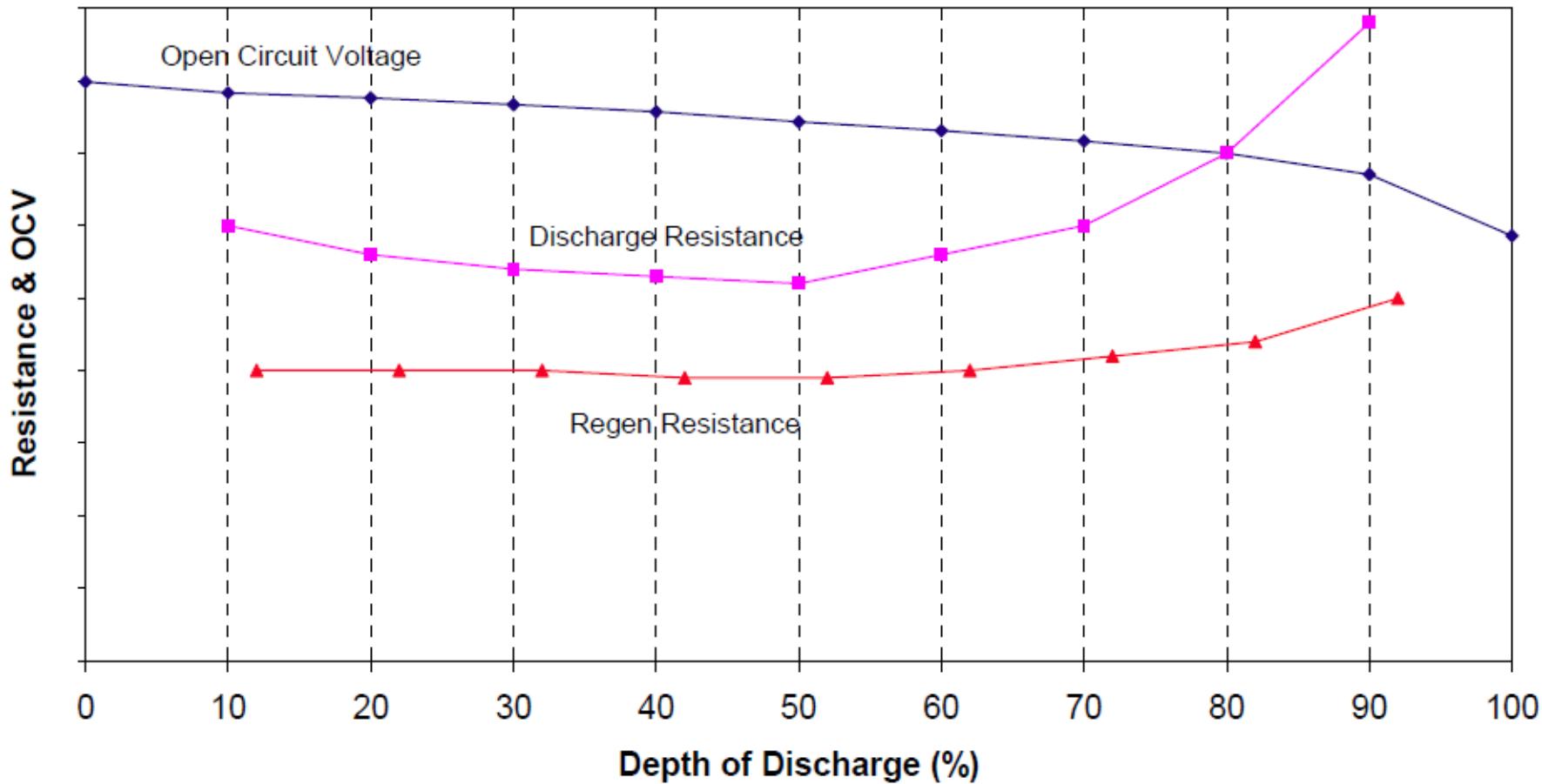
$$R_{reg\,10s} = \frac{\Delta V_{reg}}{|I_{reg}|}$$

$$R_{disch\,10s} = \frac{\Delta V_{disch}}{|I_{disch}|}$$

### Attention

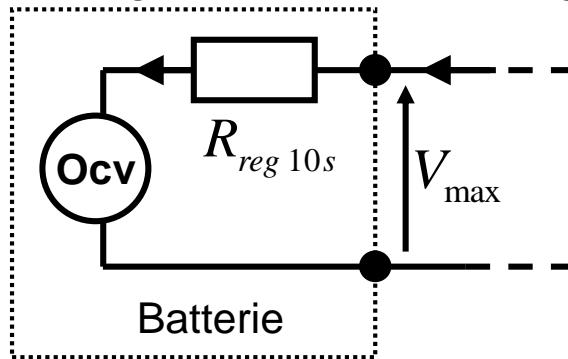
Ces résistances n'ont pas de signification physique. Elles sont par contre peu sensibles aux aléas de mesure.



*Exploitation du profil HPPC : “Resistance 10s “ et OCV(DOD)*

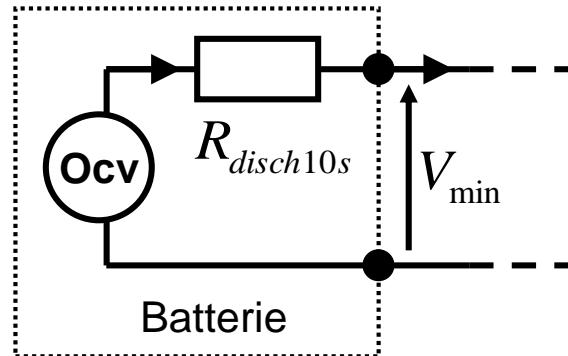
## *Exploitation du profil HPPC : Puissance impulsionale disponible versus DOD*

Recharge de la batterie (regen)



$$P_{reg\ max} = V_{max} \frac{(V_{max} - Ocv)}{R_{reg\ 10s}}$$

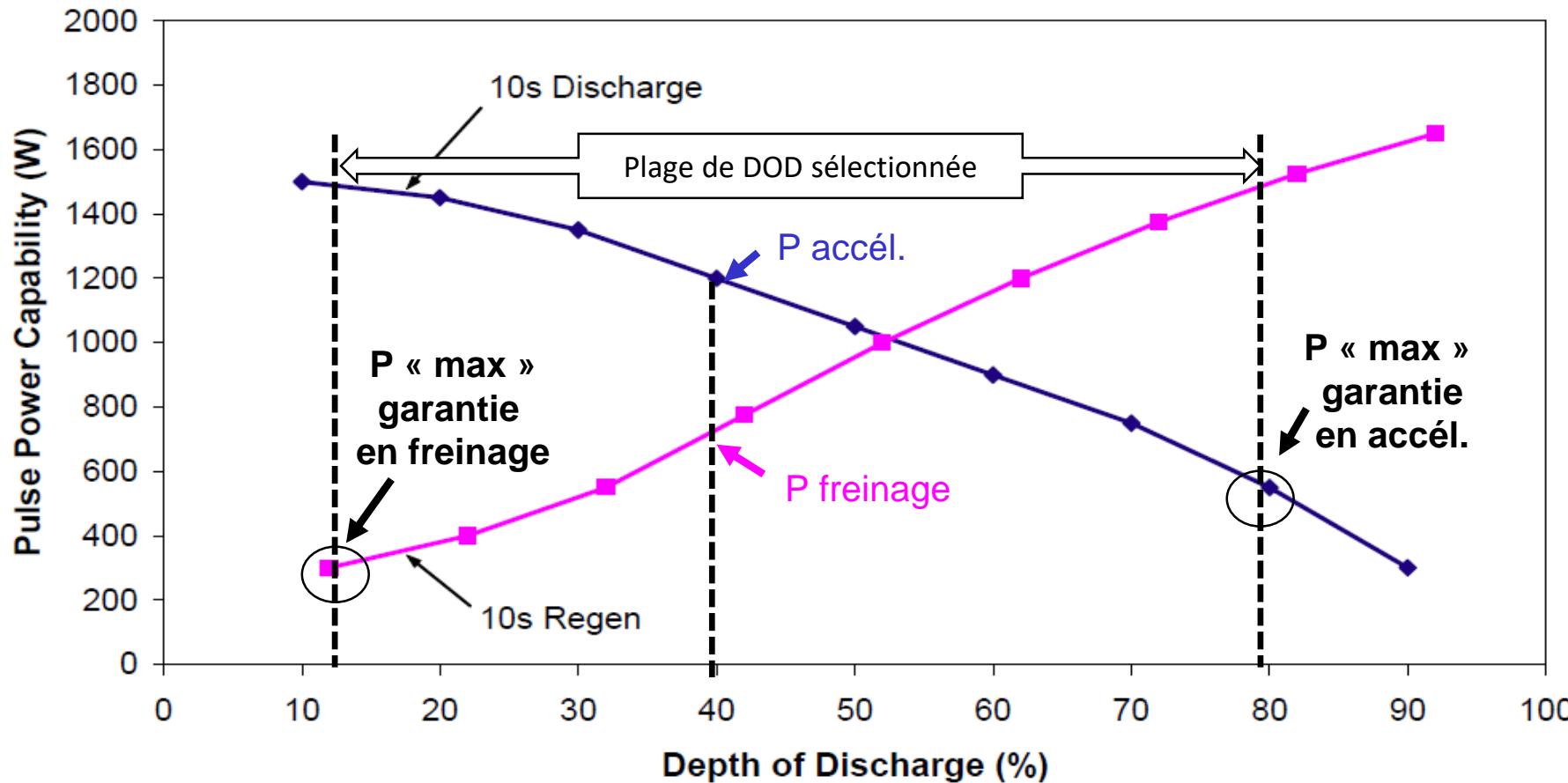
Décharge de la batterie (discharge)



$$P_{disch\ max} = V_{min} \frac{(Ocv - V_{min})}{R_{disch\ 10s}}$$

$V_{max}$  et  $V_{min}$  sont fournies par le constructeur de la batterie

## *Exploitation du profil HPPC : Puissance impulsionale disponible versus DOD*





**Janvier 2013 : Boeing 787**



## **Introduction aux questions de sécurité et de surveillance des batteries Lithium**

- Les tests de sécurité
- Sécurité intrinsèque liée aux matériaux
- Sécurité liée à la fabrication des batteries
- Sécurité liée à l'usage des batteries
- Fonctions de surveillance réalisées par le BMS
- Réglementation pour le transport de batteries Lithium

# Accidents mettant en cause des batteries



Une Tesla S prend feu à Biarritz sans raison apparente lors d'un essai (2016)



Une Tesla prend feu en Californie, "en plein trafic" sans raison apparente (2018)



Une Tesla S prend feu en Autriche après avoir heurté une rambarde de sécurité (2017)

- Des accidents très médiatisés mais pas « plus » fréquents
- Des précautions spécifiques à la batterie



HP rappelle 50 000 ordinateurs suite à des risques de feu de batteries (janvier 2018)

Une batterie au lithium prend feu dans un bagage peu après le décollage d'un vol JetBlue entre New York JFK et San Francisco (2017)



Samsung rappelle tous les téléphones Note 7 – coût estimé 5 Milliards de \$ (2016)

## UL - Underwriters Laboratories

- UL 1642: Lithium Batteries
- UL 1973: (Proposed) Batteries for Use in Light Electric Rail (LER) Applications and Stationary Applications
- UL 2054: Household and Commercial Batteries
- UL Subject 2271: Batteries For Use in Light Electric Vehicle Applications
- UL 2575: Lithium-Ion Battery Systems for Use in Electric Power Tool and Motor Operated, Heating and Lighting Appliances
- UL Subject 2580: Batteries For Use in Electric Vehicles

## Institute of Electrical and Electronics Engineers

- IEEE 1625: Rechargeable Batteries for Multi-Cell Mobile Computing Devices
- IEEE 1725: Rechargeable Batteries for Cellular Telephones

## Society of Automotive Engineers

- J2464: Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage Systems (RESS), Safety and Abuse Testing
- J2929: Electric and Hybrid Vehicle Propulsion Battery System Safety Standard — Lithium-based Rechargeable Cells

## International Electrotechnical Commission

- IEC 62133: Secondary Cells and Batteries Containing Alkaline or Other Non-acid Electrolytes — Safety Requirements for Portable Sealed Secondary Cells, and for Batteries Made from Them, for Use in Portable Applications
- IEC 62281: Safety of Primary and Secondary Lithium Cells and Batteries During Transportation

## United Nations (UN)

- Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Manual of Tests and Criteria, Part III, Section 38.3

## Japanese Standards Association

- JIS C8714: Safety Tests for Portable Lithium-Ion Secondary Cells and Batteries For Use In Portable Electronic Applications

## Battery Safety Organisation

- BATSO 01: (Proposed) Manual for Evaluation of Energy Systems for Light Electric Vehicle (LEV) — Secondary Lithium Batteries

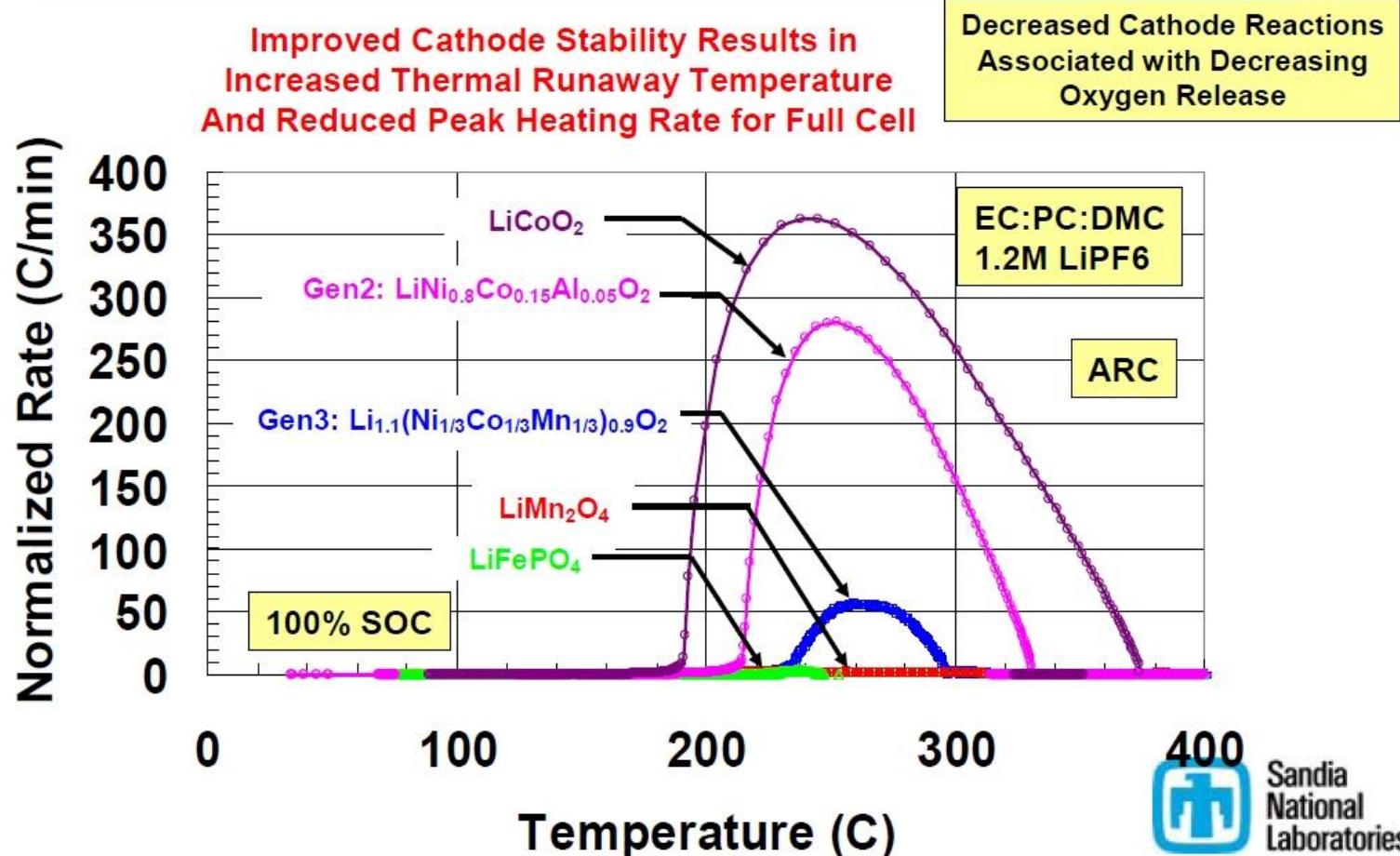
***Chaque procédure définit : la nature des tests, le protocole expérimental, le nombre de tests, ...***

# Comparaison de quelques procédures de test

	UL 2580	IEC 62133	SAE J2464	UN III,S 38.3	IEEE 1625	JIS C8714
External short circuit	★	★	★	★	★	★
Abnormal charge	★	★	★	★	★	★
Forced discharge	★	★	★	★	★	★
Crush	★	★	★		★	★
Impact	★			★	★	
Shock	★	★	★	★	★	★
Vibration	★	★	★	★	★	★
Heating	★	★	★		★	★
Temperature cycling	★	★	★	★	★	★
Low pressure (altitude)	★	★		★	★	★
Projectile	★				★	
Drop	★	★				★
Continuous low rate charging			★			★
Insulation resistance	★					
Reverse charge	★					
Penetration	★		★			
Internal short circuit test	★					



## Thermal Runaway Cathode Comparisons

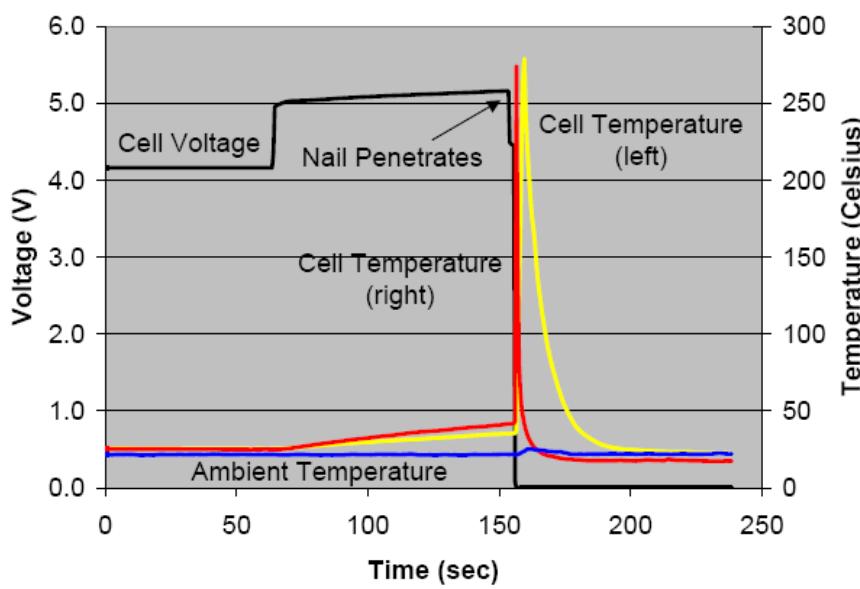


Sandia  
National  
Laboratories

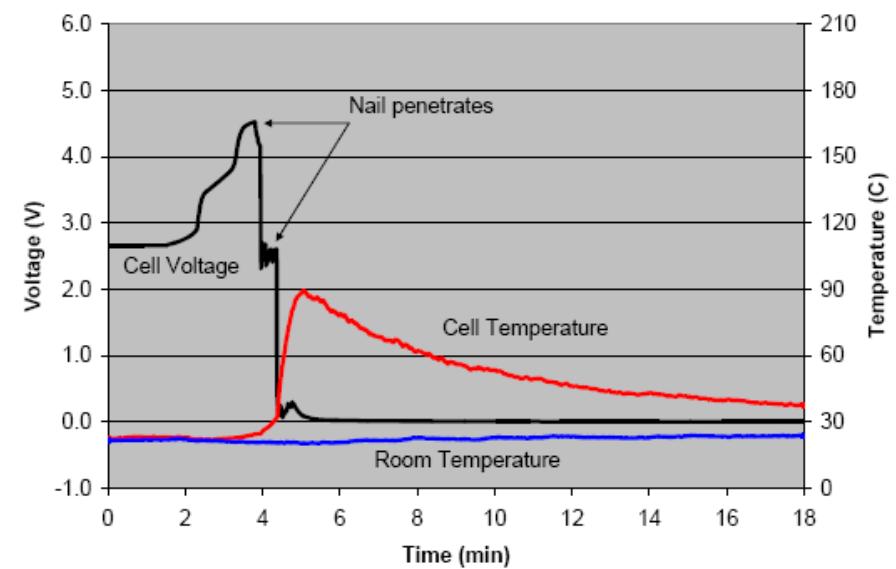
Le test du clou



Batterie A

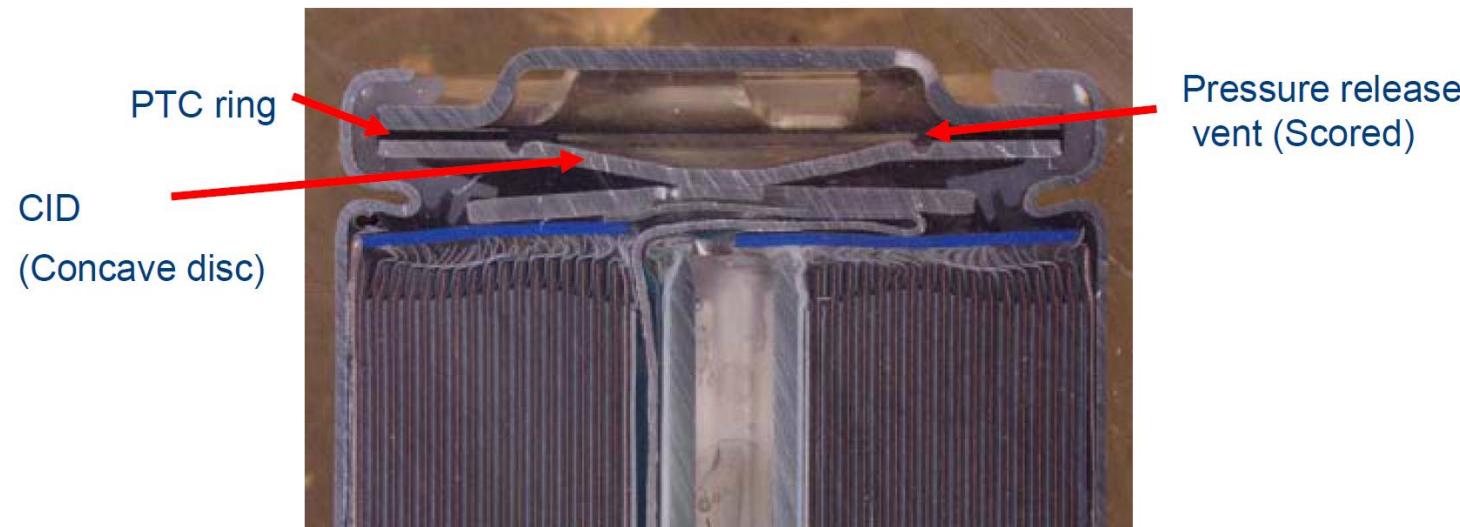


Batterie B



La fabrication des cellules peut/doit intégrer des dispositifs de protection thermique

- Limitation du courant (PTC)
- Ouverture du circuit électrique (fusible, CID)
- Soupape de surpression



## Thermal Protection within the Cell

CID = Current Interrupt Device (thermo-mécanique)

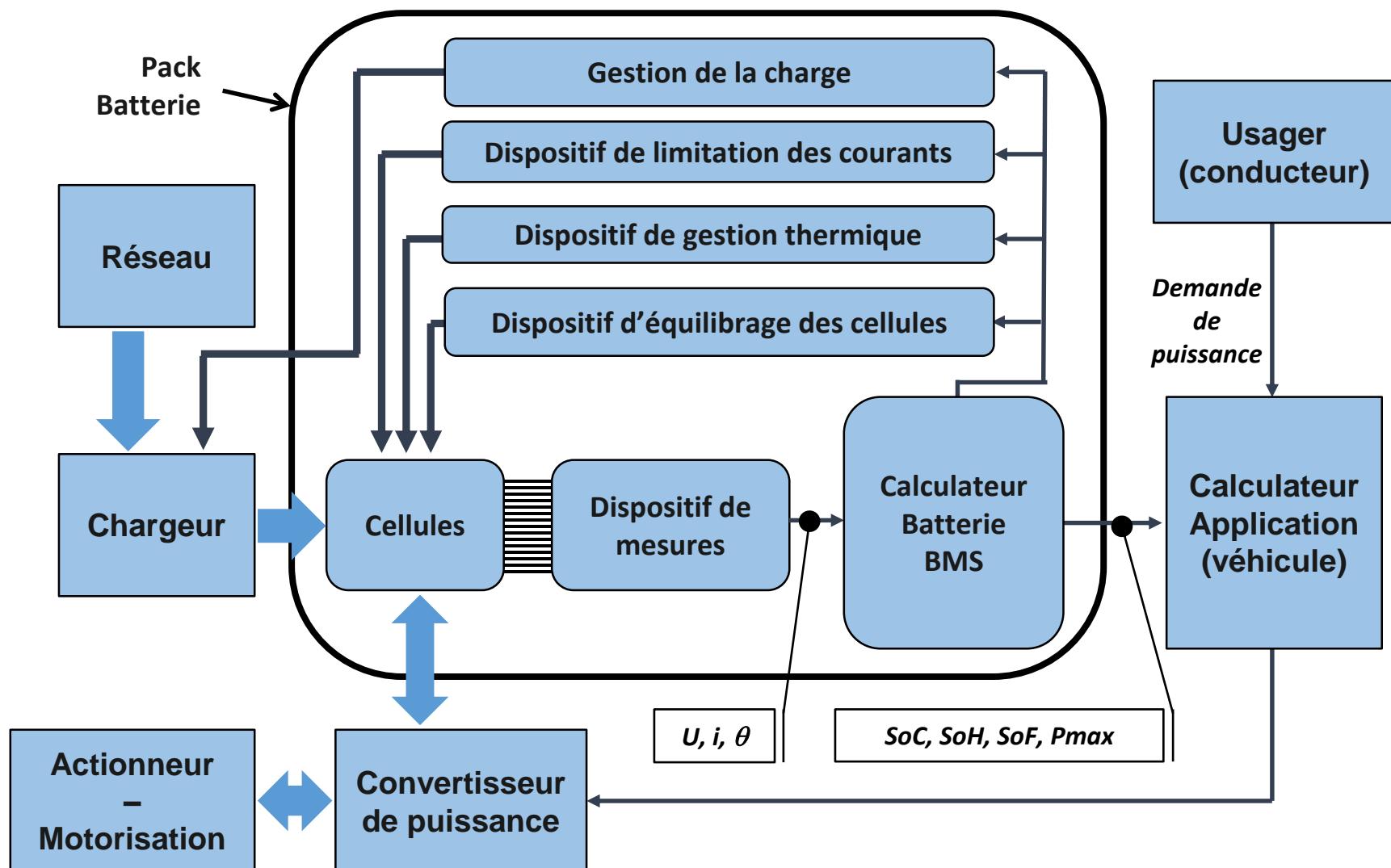
PTC = Positive Temperature Coefficient (thermo-électrique)

## La surveillance active : le BMS« Battery Management System »

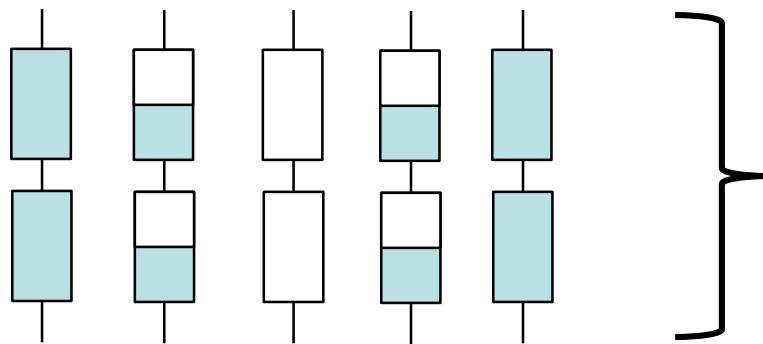
- Surveillance de la tension et de la température de chaque élément de la batterie
- Calcul du SOC de la batterie et/ou de chaque élément
- Calcul des indicateurs
  - SOH (state of health),
  - SOF (state of function),
  - SOE (state of energy)
- Supervision de l'équilibrage des éléments (voir plus loin)
- Délestage éventuel de modules de la batterie (si mise en parallèle)

***Le BMS est l'élément clé dans la sécurité des batteries Lithium-ion***

***⇒ certains constructeurs ne livrent pas une batterie sans le BMS***



# Les associations en série de cellules Lithium

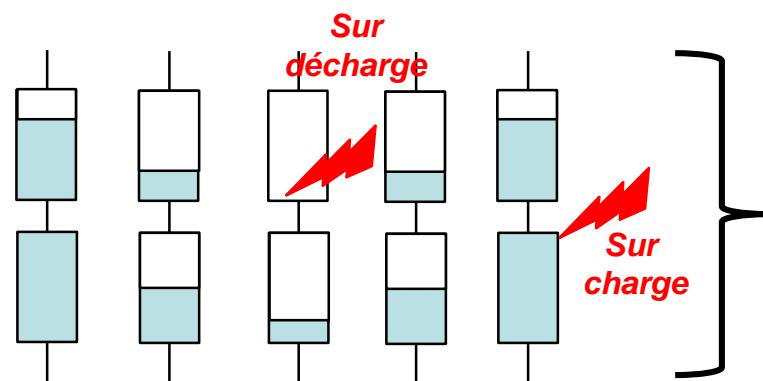


**Cas d'éléments équilibrés**

- 100% de la capacité disponible
- Limites de tension respectées
- Limites de courant respectées

Décharge

Charge

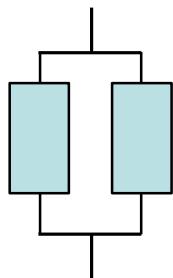


**Cas d'éléments non équilibrés**

- 100% de la capacité non disponible
- Limites de tension non respectées
- Limites de courant respectées

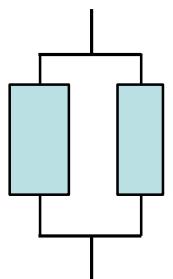
⇒ Besoin d'équilibrage pour respecter les limites de tension en utilisation

⇒ Besoin de surveiller et maîtriser la tension de chaque cellule de la batterie



### Cas d'éléments identiques

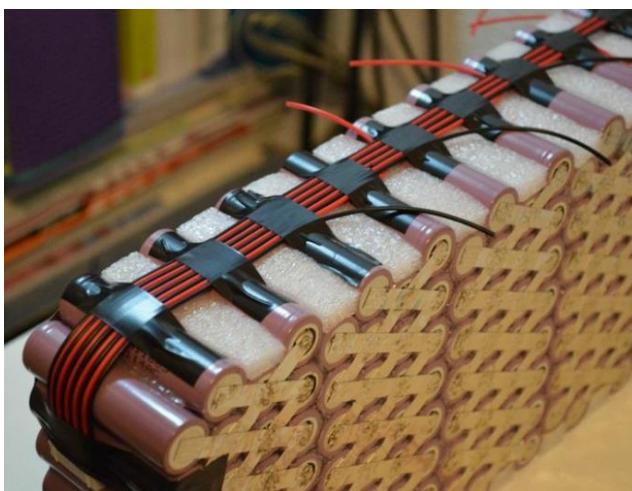
- L'équilibrage en tension est automatique
- Le courant se répartit à égalité entre les cellules



### Cas d'éléments non identiques

- L'équilibrage en tension est automatique
- La répartition du courant entre les cellules n'est pas maîtrisée

Besoin d'élément de contrôle du courant (fusible,...)



Mise en parallèle  
« directe »  
Danger potentiel



Mise en parallèle  
avec fusible  
Sécurité assurée

GEEKCAR

Les éléments ne sont pas initialement rigoureusement identiques

Le vieillissement amplifie les écarts

La difficulté augmente avec le nombre de cellules

Tesla       $\Rightarrow$  7000 éléments

Zoé       $\Rightarrow$  192 éléments

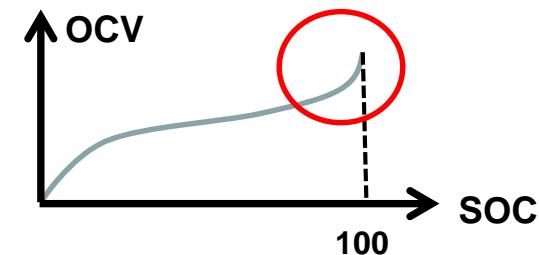
Un déséquilibre entre les éléments d'un pack peut avoir 2 causes :

Cas 1: **Différence d'état de charge (SOC)** : autodécharge, ...  
 $\Rightarrow$  effet lent : équilibrage occasionnel

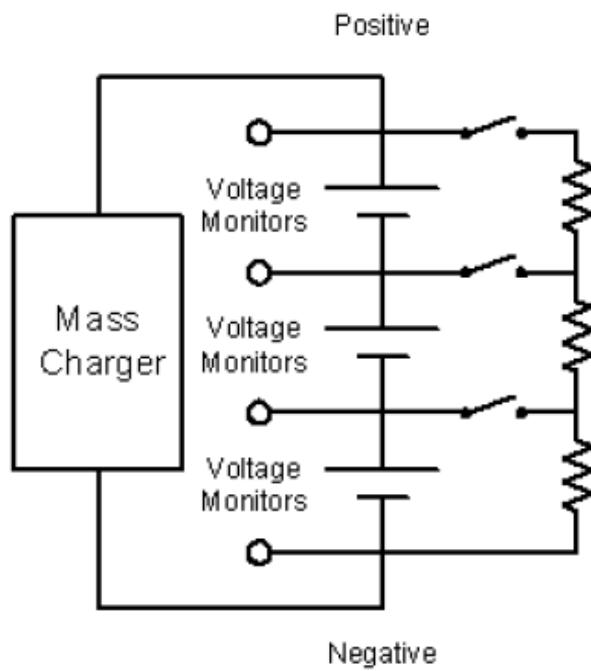
Cas 2 : **Différence de capacité** : dispersion, vieillissement,...  
 $\Rightarrow$  effet permanent : équilibrage à chaque cycle

L'équilibrage intervient le plus souvent lorsque la batterie est en fin de charge

- $dV/dSOC$  de plus forte valeur
- source d'énergie extérieure (chargeur)
- $SOC = 0$  rarement atteint

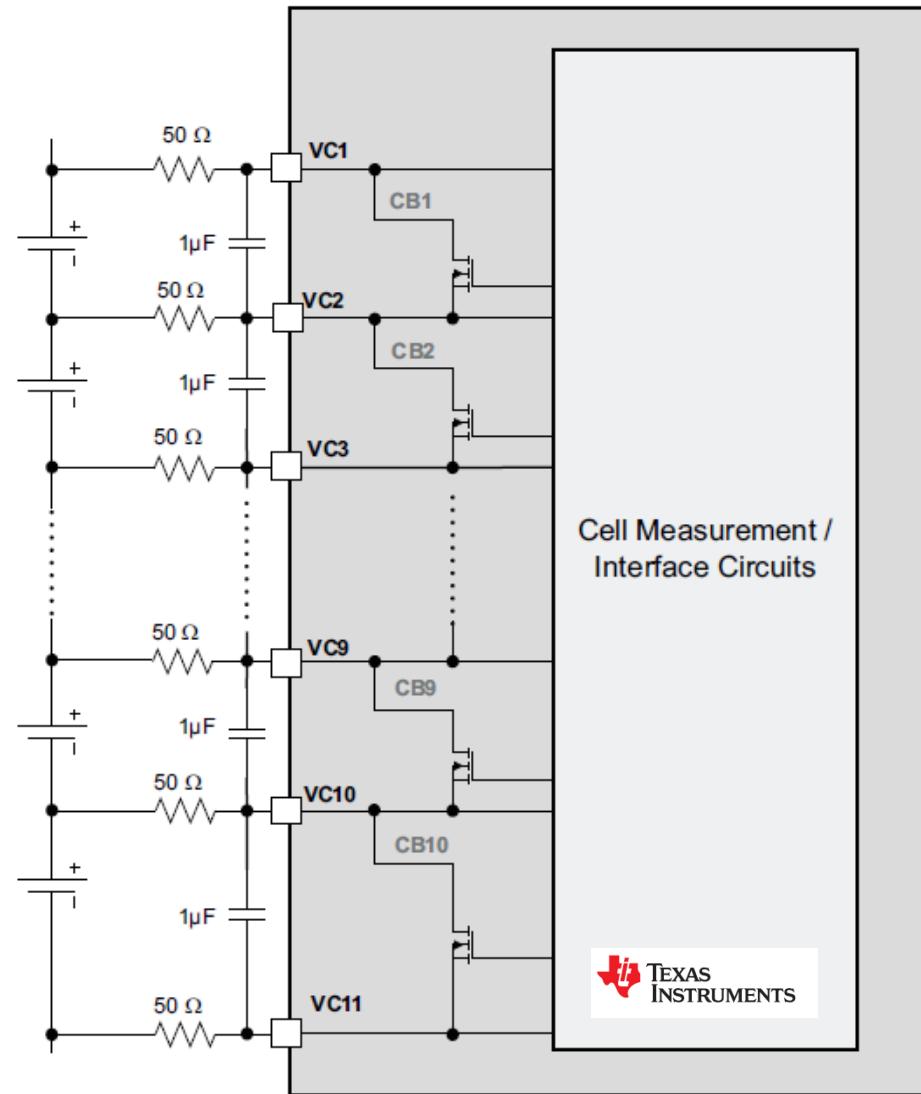


On distingue l'équilibrage **dissipatif** et le **non-dissipatif (= distributif)**

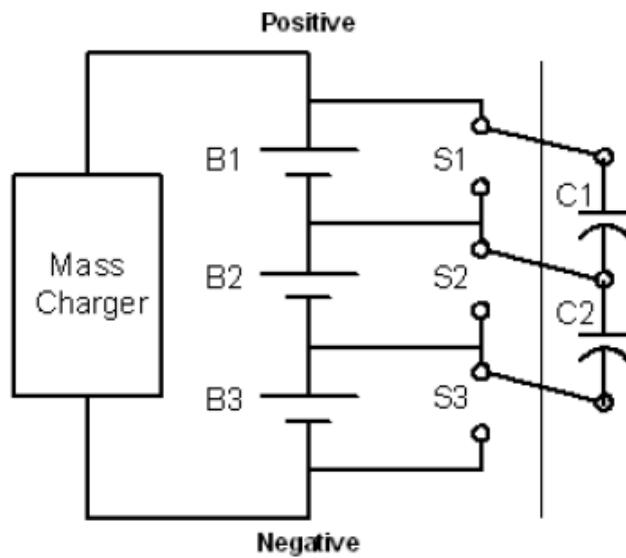


Source : J. Cao IEEE-VPPC 2008

**Equilibrage par résistance**  
*Facile, coûteux en énergie*

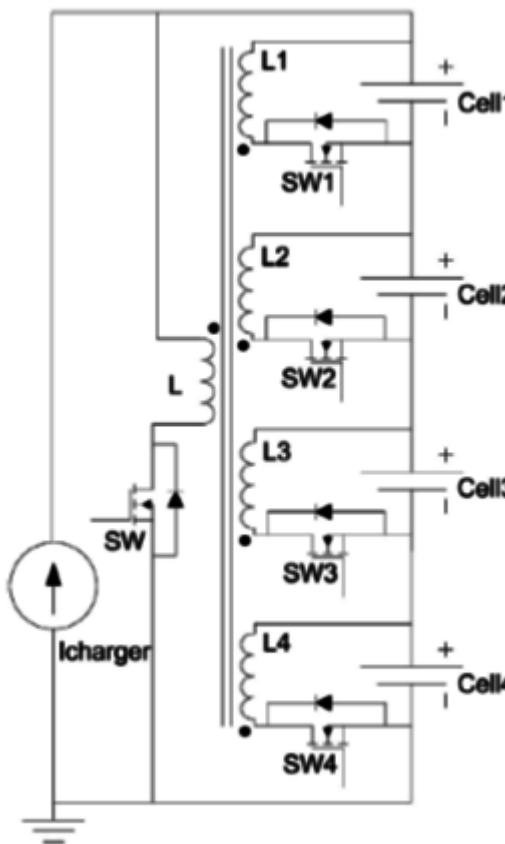


*Exemple de réalisation BQ77910A*



Equilibrage par condensateur  
*Facile, bon rendement*

Source : J. Cao IEEE-VPPC 2008



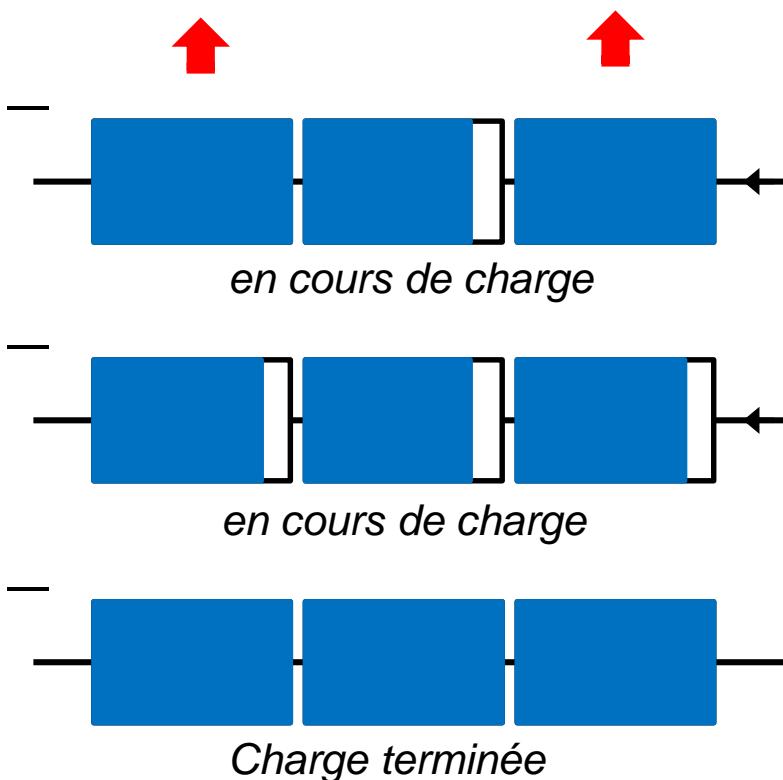
Equilibrage par transformateur  
*Bidirectionnel (élément vers élément)*

Source : J Gallardo-Lozano et al. Journal of Power Sources 2014

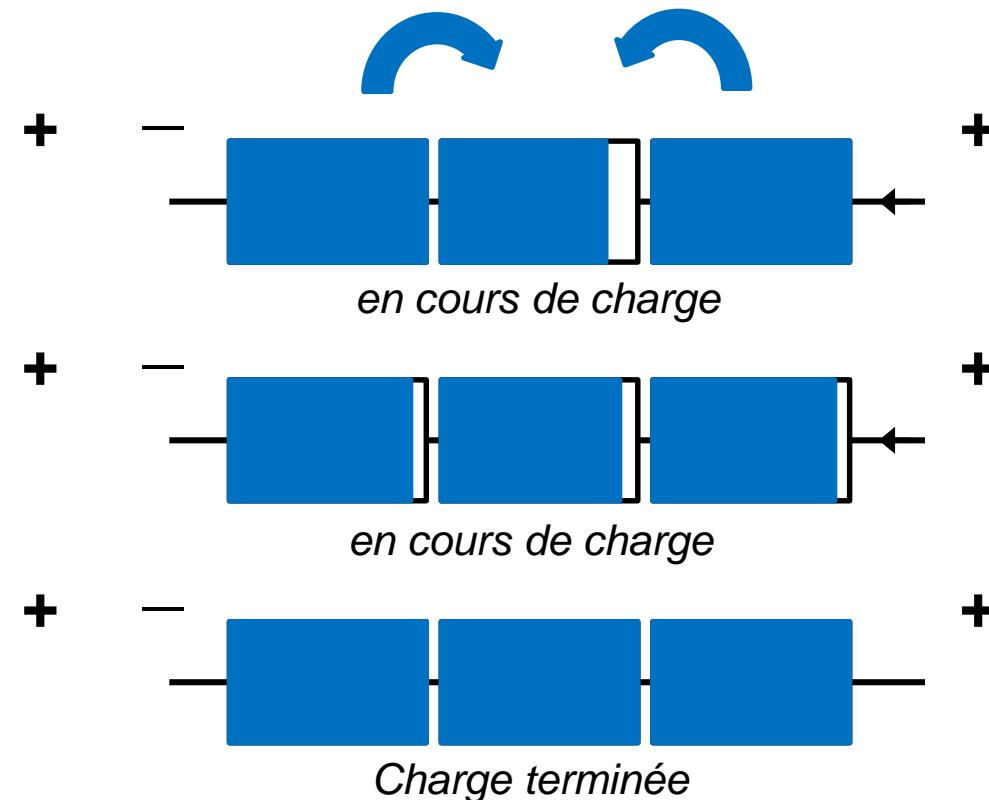
## Cas 1 : déséquilibre d'état de charge entre des éléments

- autodécharge (effet +/- permanent selon la durée)
- rendement de charge différent (effet permanent)

Equilibrage dissipatif



Equilibrage non dissipatif

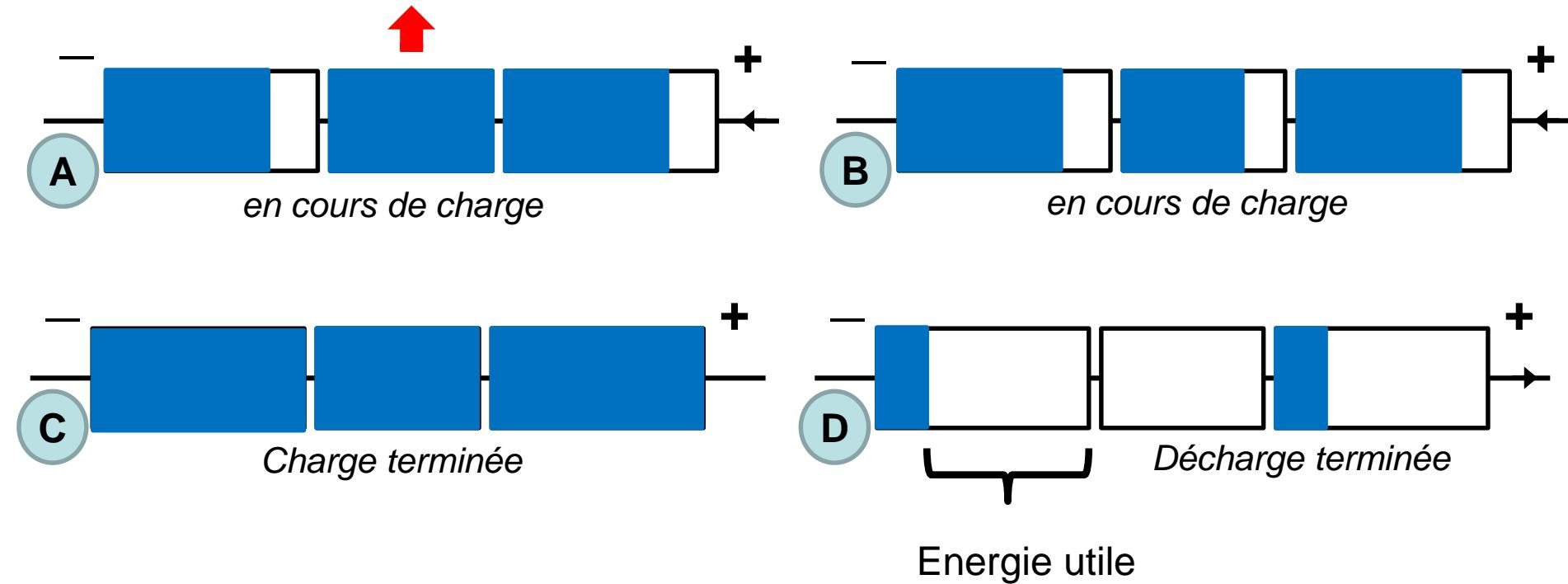


**Les 2 types d'équilibrages permettent de restaurer la capacité de l'assemblage**

## Cas 2 : déséquilibre de capacité entre des éléments

- vieillissement ou dispersion
- effet permanent (à chaque cycle)

Equilibrage dissipatif

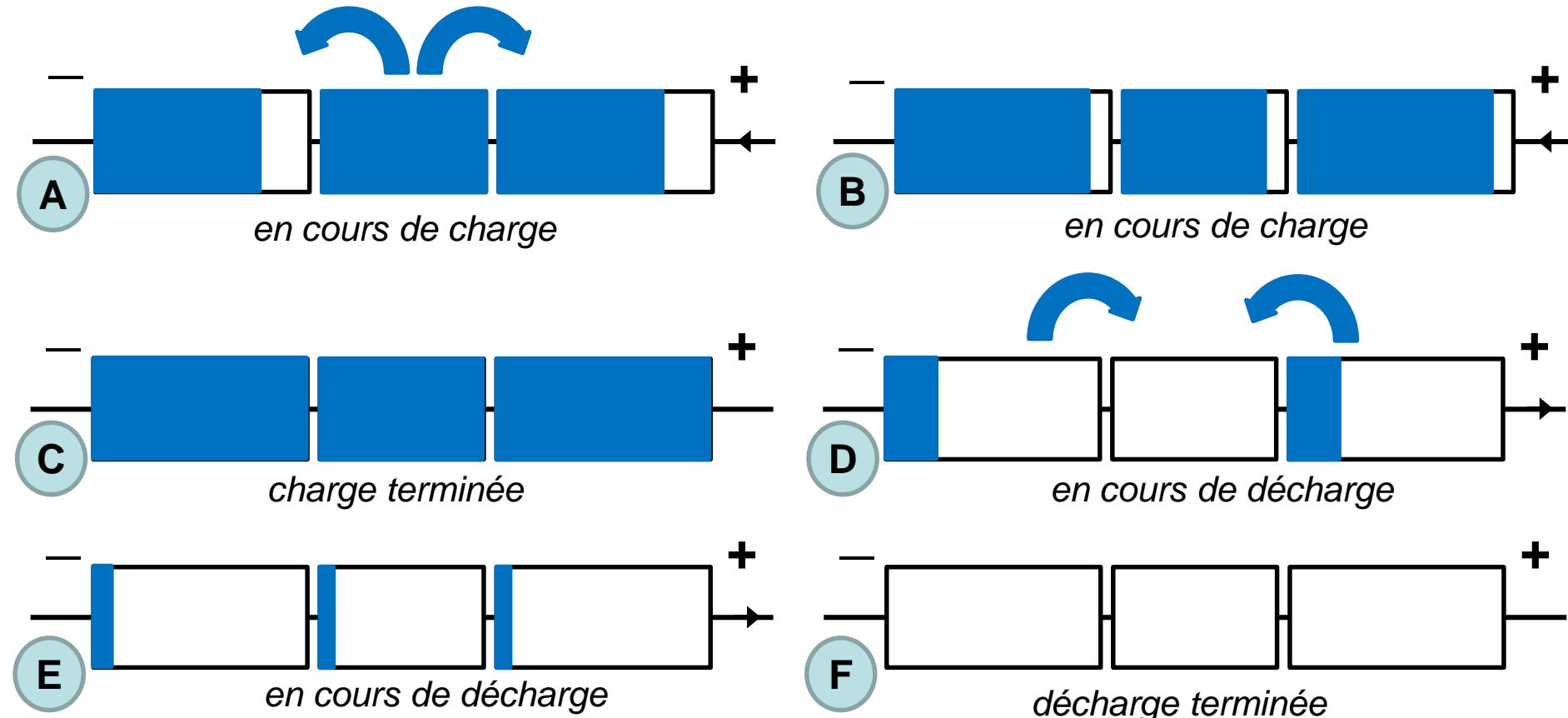


- ⇒ L'équilibrage dissipatif ne permet pas d'utiliser toute l'énergie stockée
- ⇒ La capacité de l'ensemble est limitée par l'élément de plus faible capacité

## Cas 2 : déséquilibre de capacité entre des éléments

- vieillissement ou dispersion
- effet permanent (à chaque cycle)

Equilibrage non dissipatif



⇒ L'équilibrage non dissipatif permet d'utiliser toute l'énergie stockée  
(importance de la rapidité d'équilibrage ⇔ valeur du courant d'équilibrage)

Habilitation électrique des personnes suivant la tension et la capacité des batteries et la nature des interventions

Stockage de batteries :

Respect des préconisations des constructeurs (état de charge et température)  
Locaux ayant une tenue au feu d'une heure

Charge des batteries :

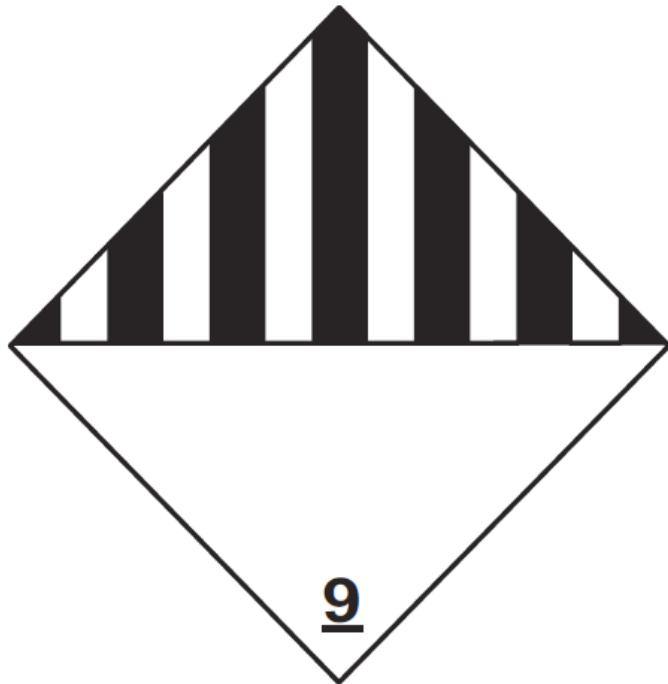
Au dessus de 600kW de puissance nécessité d'une salle de charge aux normes ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) : ventilation forcée, arrêts automatiques, extincteurs, bac de rétention,...

Impacts environnementaux :

Proposition de RÈGLEMENT DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relatif aux batteries et aux déchets de batteries, abrogeant la directive 2006/66/CE et modifiant le règlement (UE) 2019/1020 - COM/2020/798 final  
Document publié en décembre 2020 comprenant 170 pages

**Voir « INRS : Les batteries au Lithium, connaître et prévenir les risques – ED 6407 , Février 2021 »**

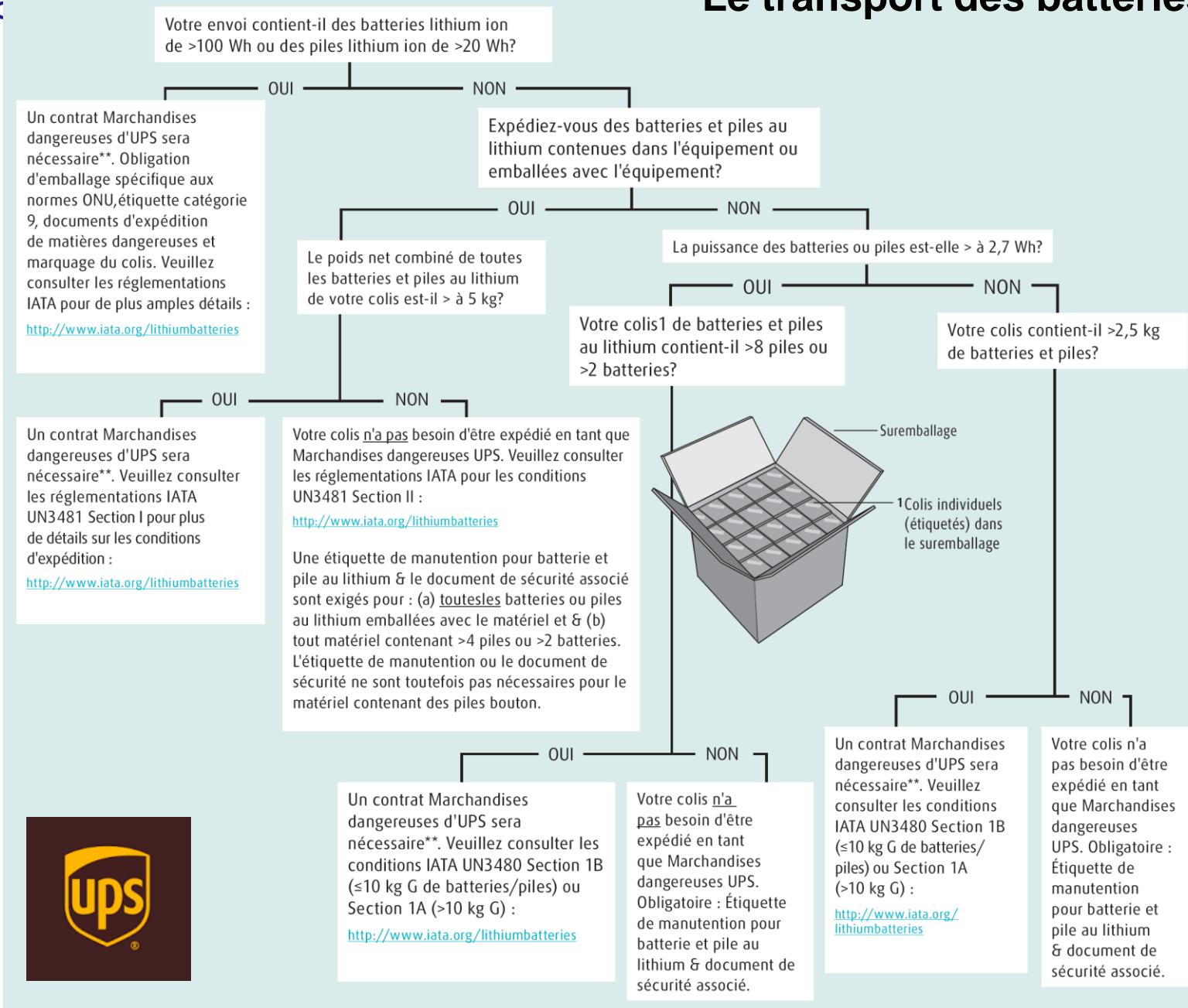
# Etiquettes pour le transport des batteries Lithium



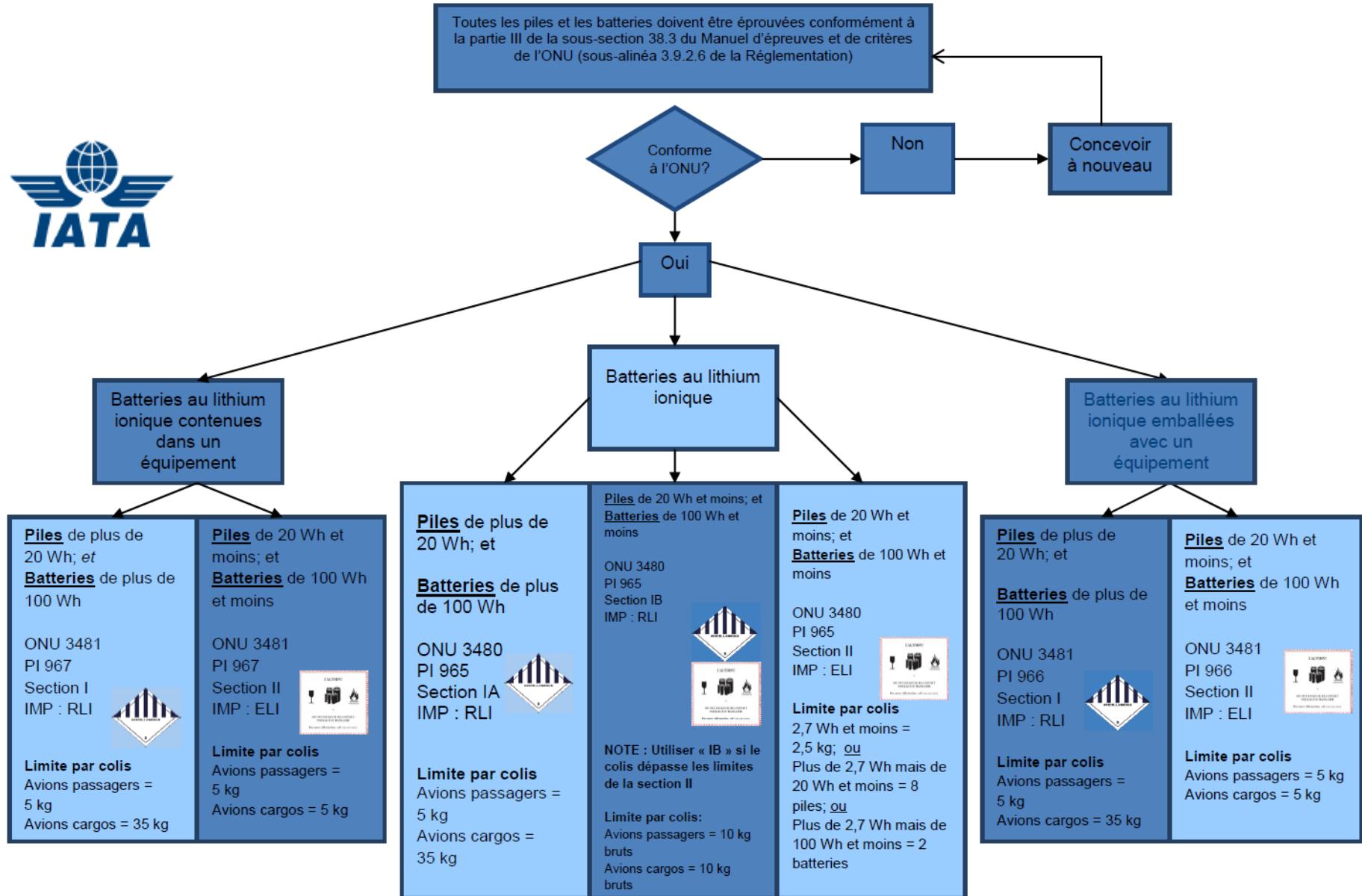
\* Place for "Lithium ion battery" and/or "Lithium metal battery"



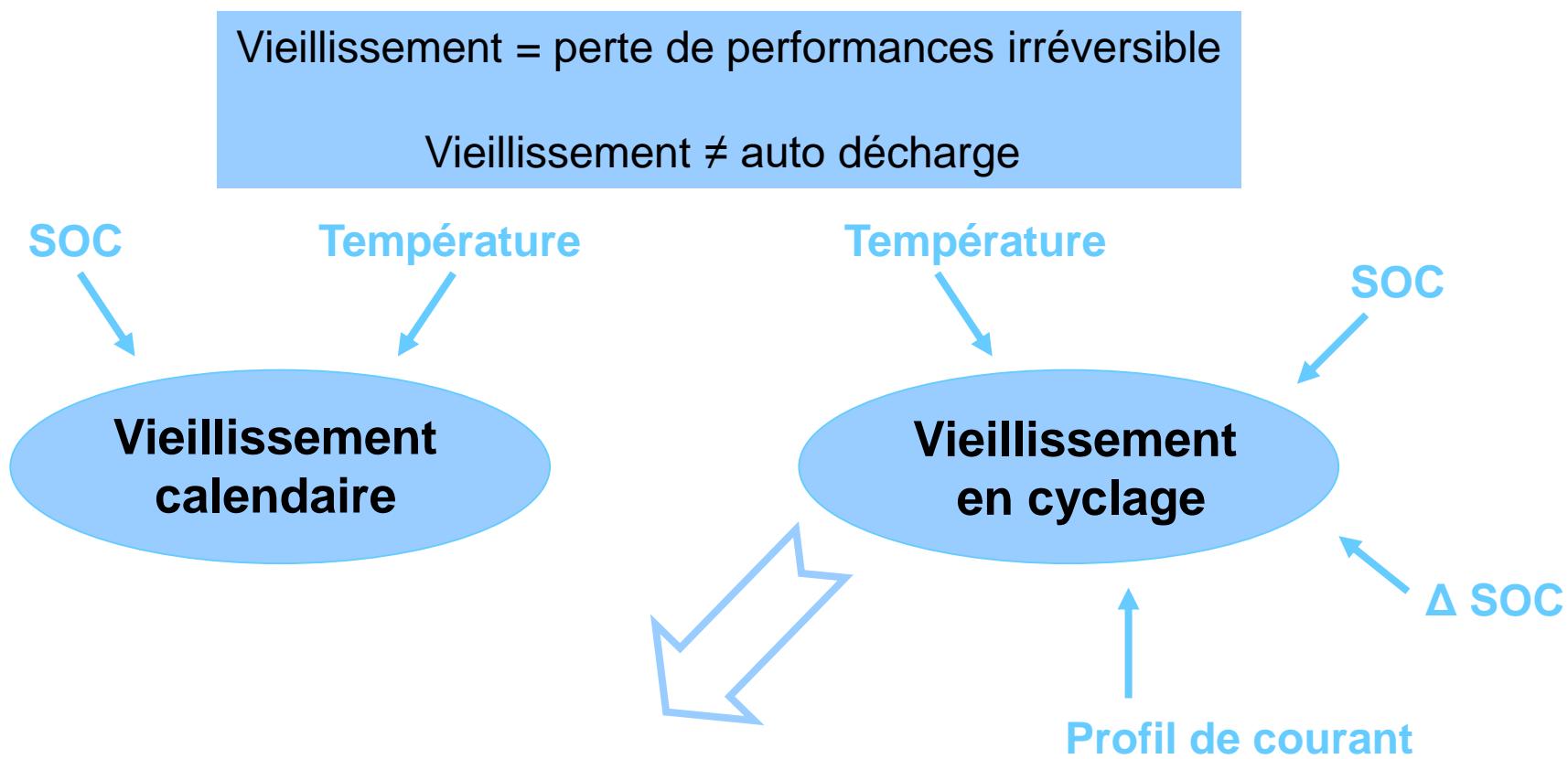
# Le transport des batteries Lithium



# Le transport aérien des batteries Lithium



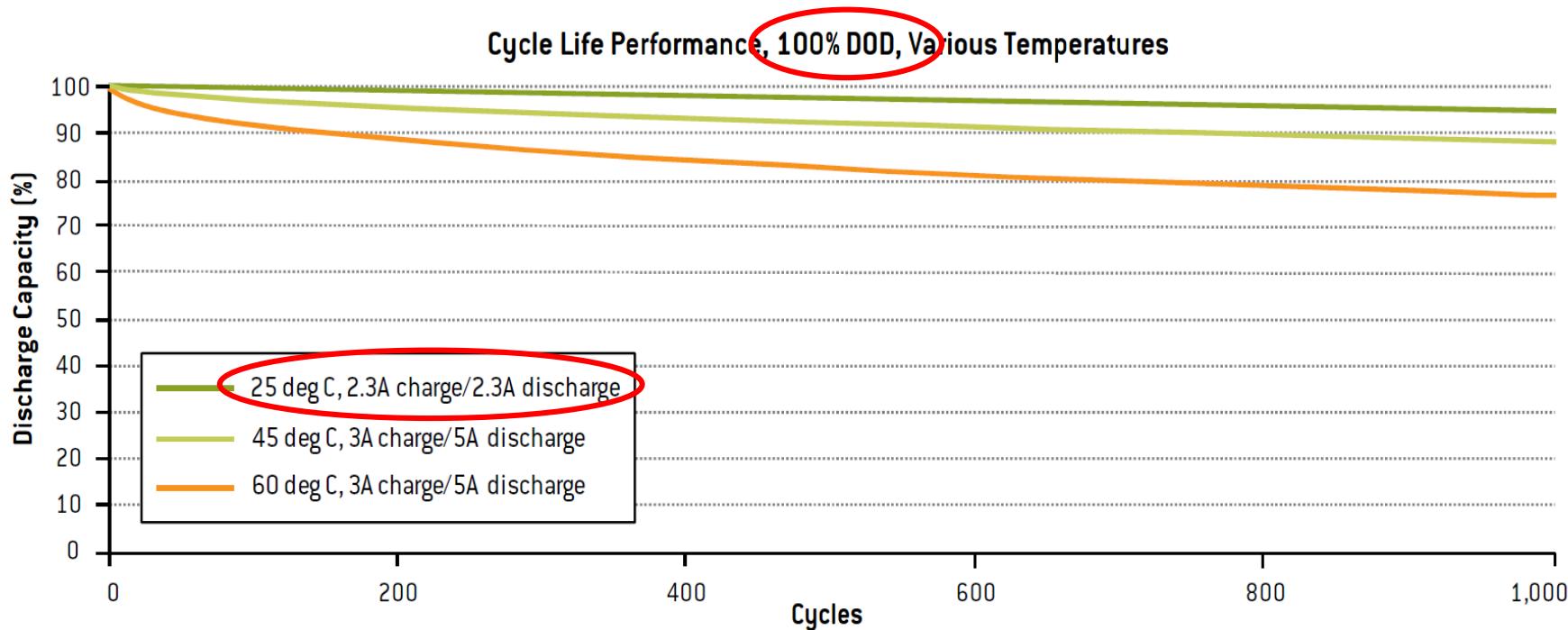
# Le vieillissement des batteries



Le vieillissement en cyclage est très dépendant de l'application (EV, HEV, PHEV,...)

Effet du vieillissement : perte de capacité et/ou augmentation d'impédance  
⇒ Perte d'autonomie et/ou perte de puissance

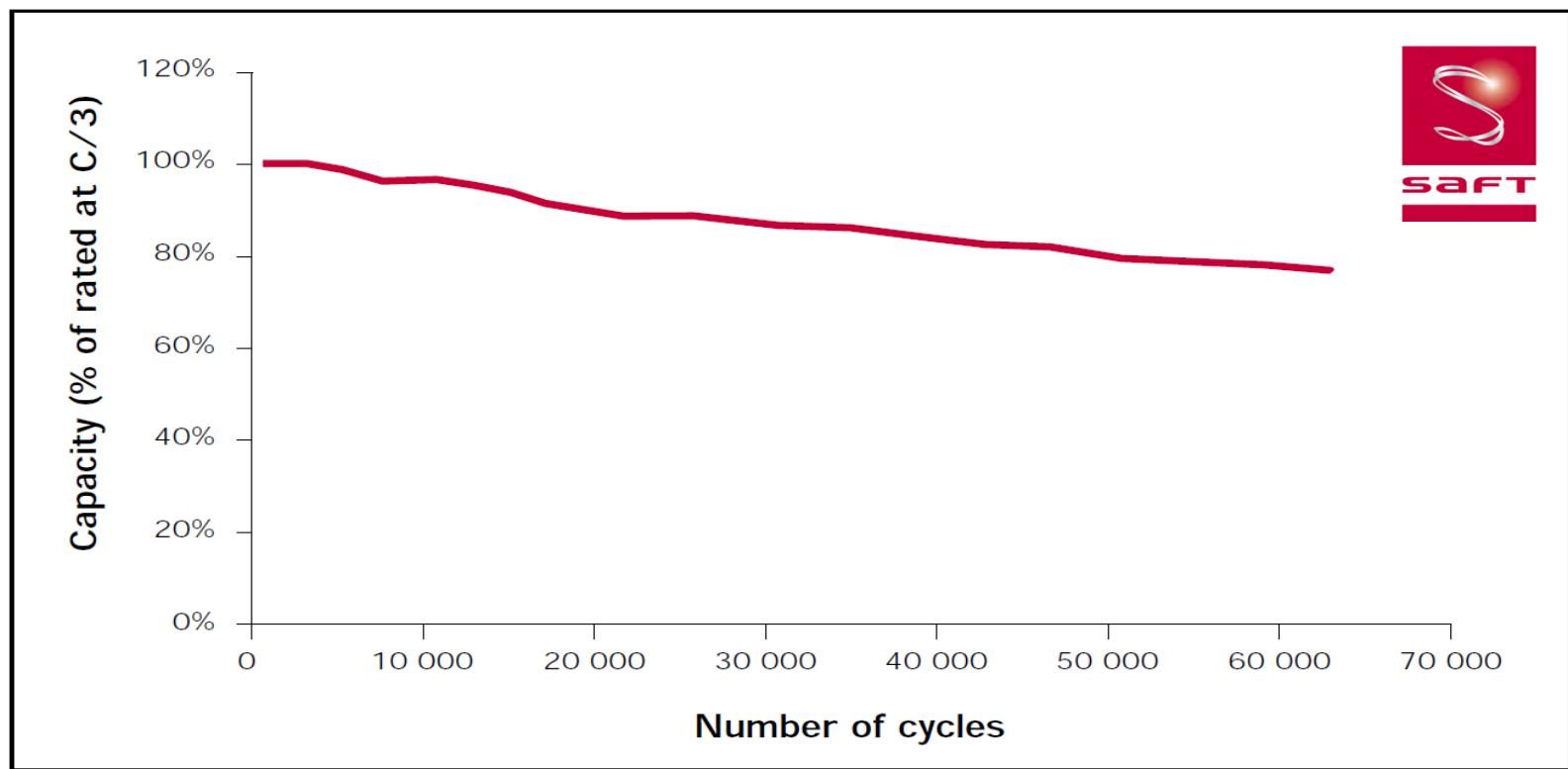
Parfois les conditions expérimentales sont explicites ...



... mais difficiles à comparer !

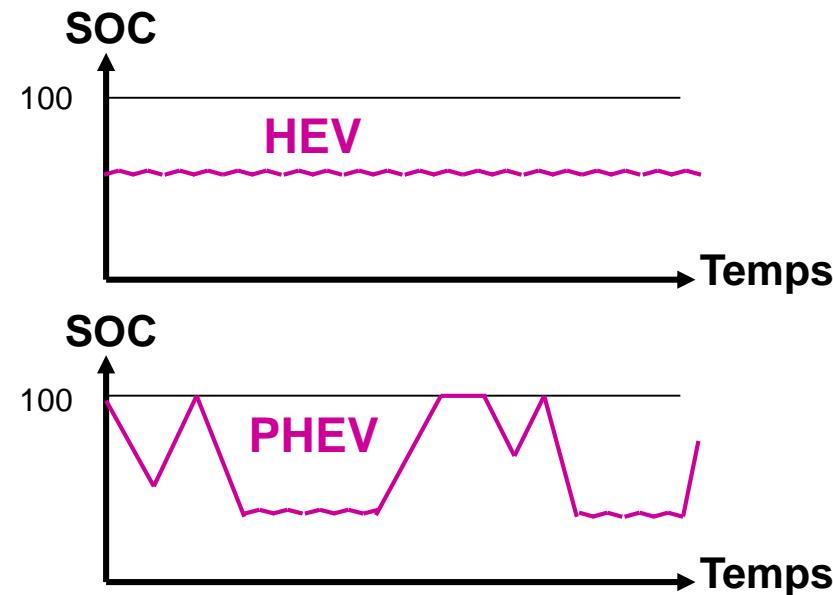
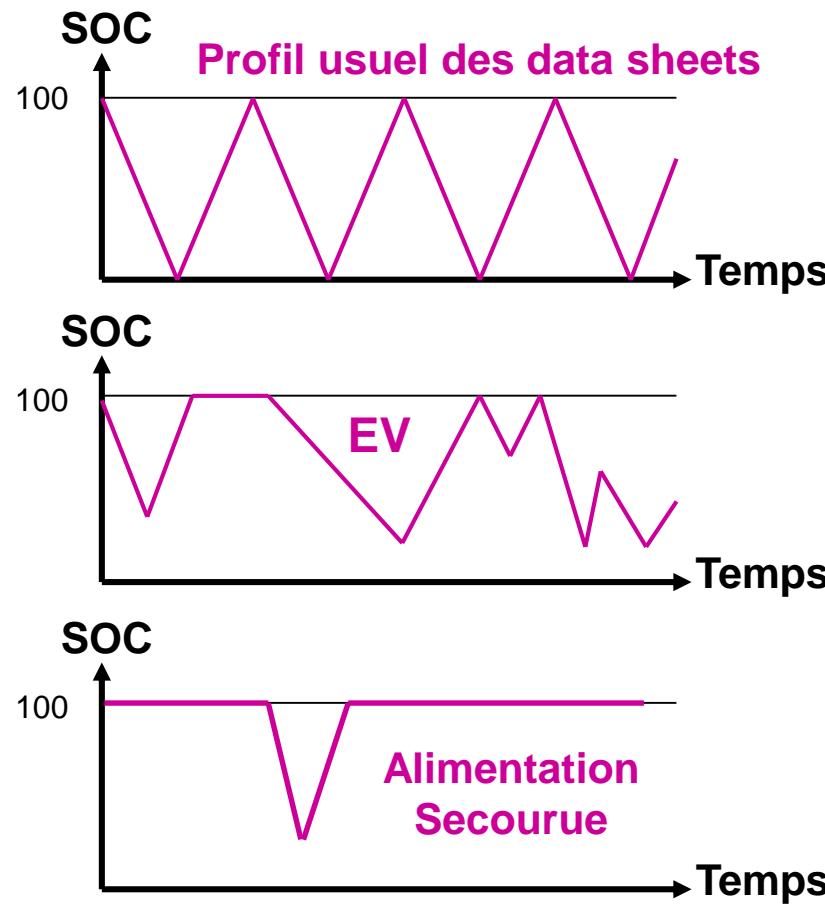
NHP module - Cycling at 20% DOD\*

Capacity at C/3 rate after full charge



\* Depth Of Discharge

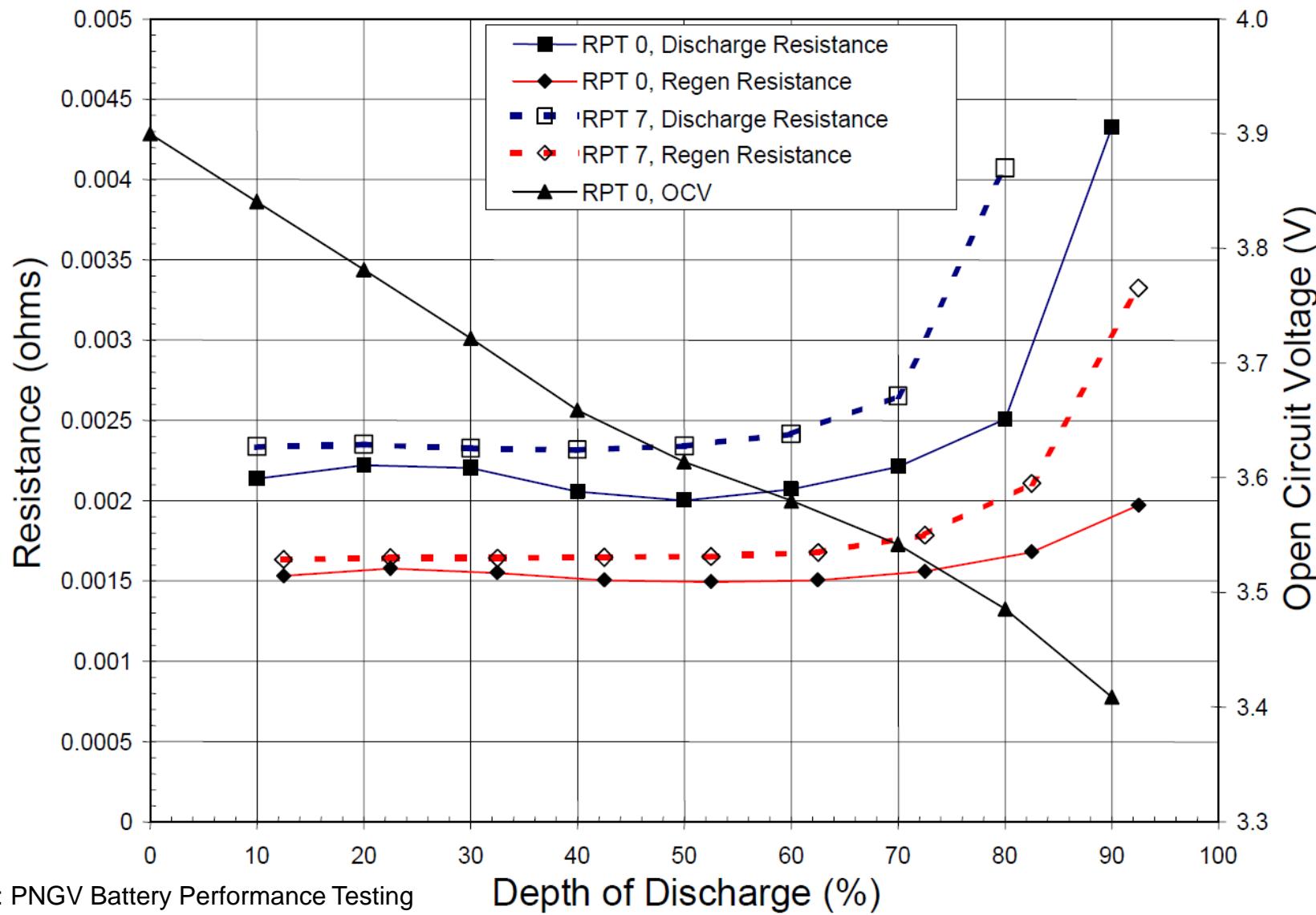
$\Delta$  SOC réel ou  $\Delta$  SOC simplifié ?



⇒ Les profils simplifiés de SOC peuvent aider à comparer des batteries, mais donnent difficilement une durée de vie “réelle”.

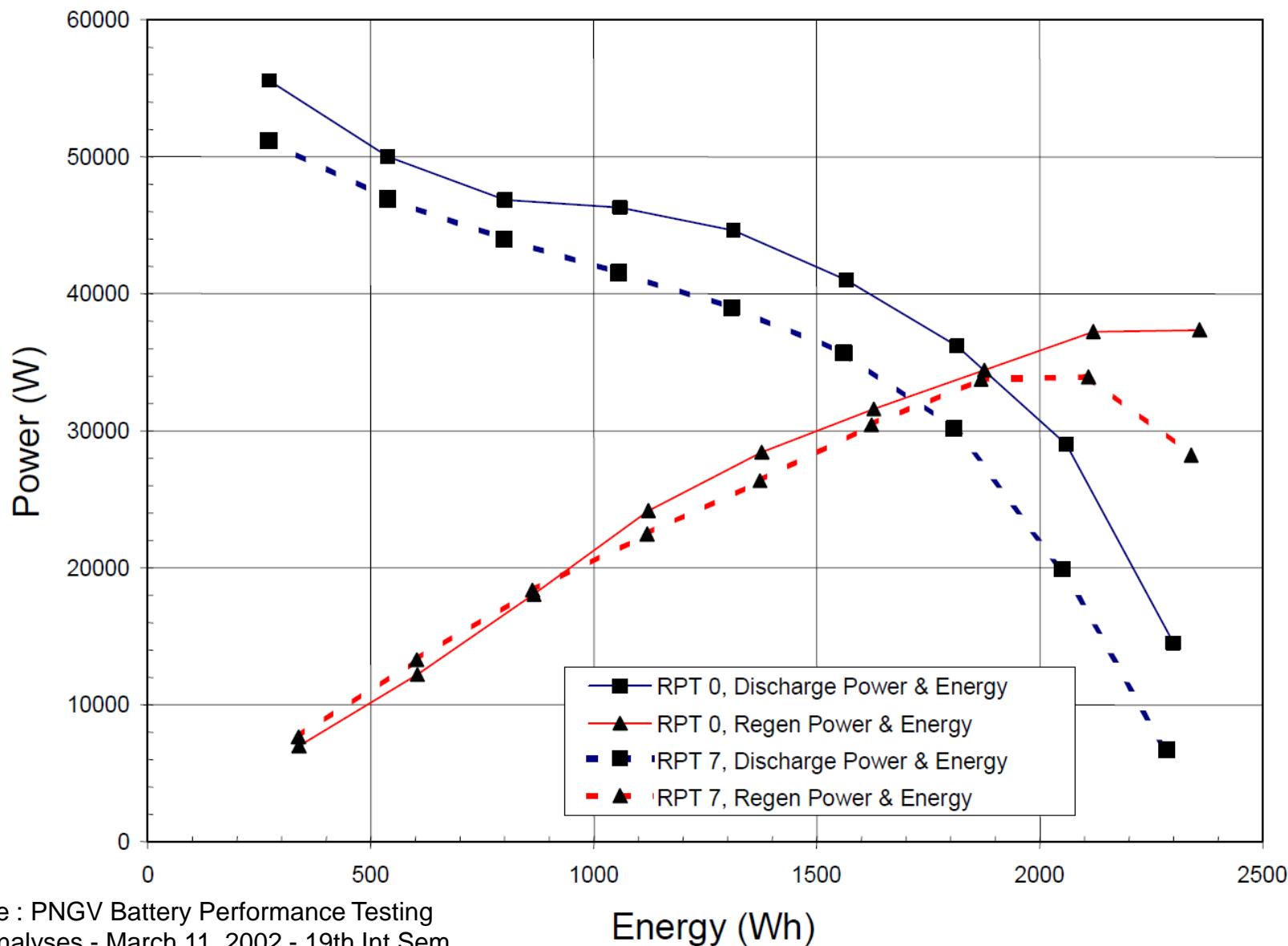
⇒ Des tests de vieillissement adaptés à l’application doivent être réalisés pour déterminer la durée de vie réelle.

# Caractérisation du vieillissement (FreedomCAR)



Source : PNGV Battery Performance Testing  
And Analyses - March 11, 2002 - 19th Int.Sem.  
On Primary And Secondary Batteries

# Caractérisation du vieillissement (FreedomCAR)



Source : PNGV Battery Performance Testing  
And Analyses - March 11, 2002 - 19th Int.Sem.  
On Primary And Secondary Batteries  
S. Pelissier - 7 avril 2021 - Campus Auto'Mobilités

**Besoin d'une approche globale (type ACV Analyse de Cycle de Vie)**

**Disponibilité des matériaux**

**Bilan environnemental de la fabrication de batteries**

**Recyclage**

**Besoin de transparence sur les données, de consolidation des méthodes ACV pour identifier les verrous et les points « noirs »**



Matières premières



Fabrication



Distribution



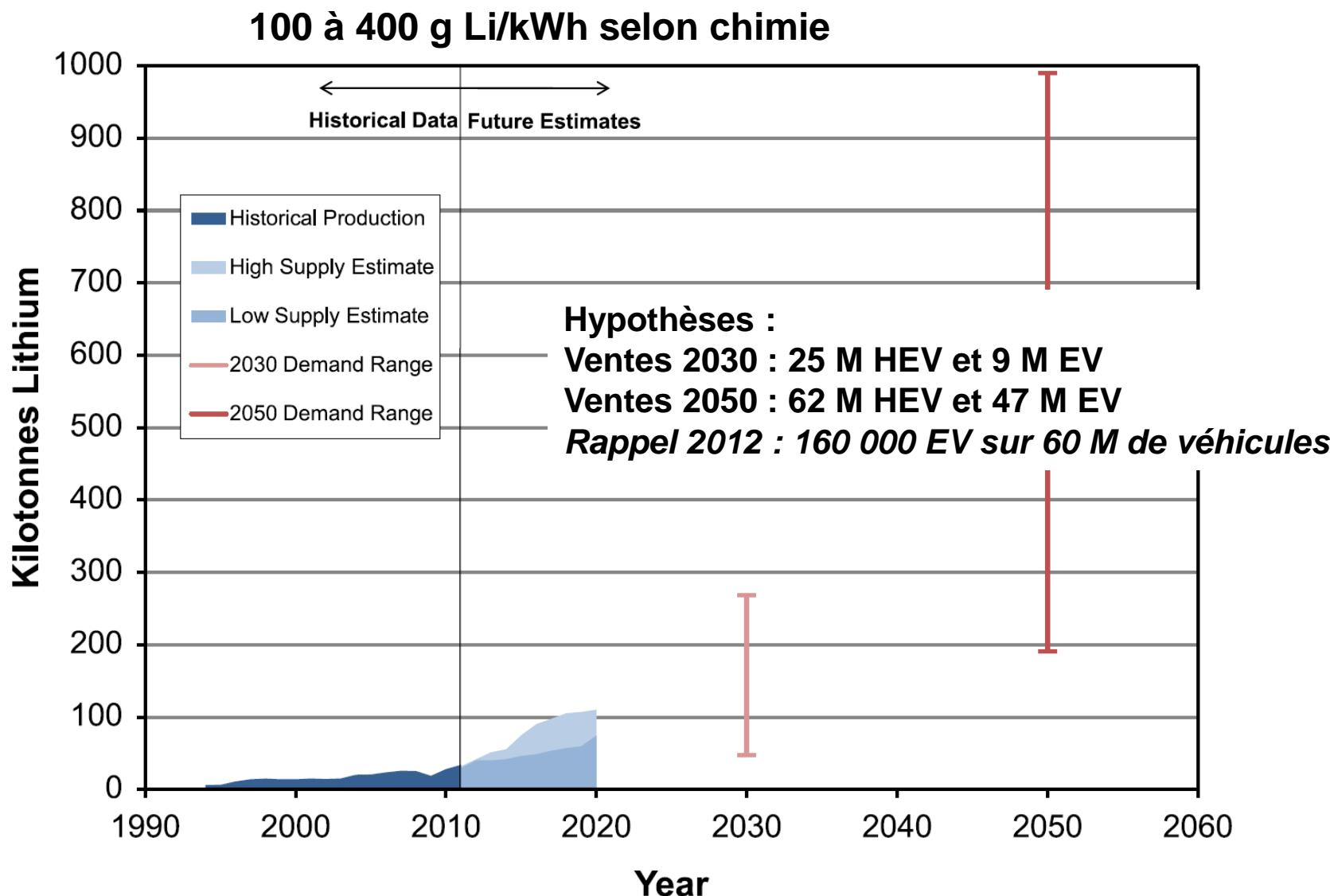
Fin de vie - recyclage



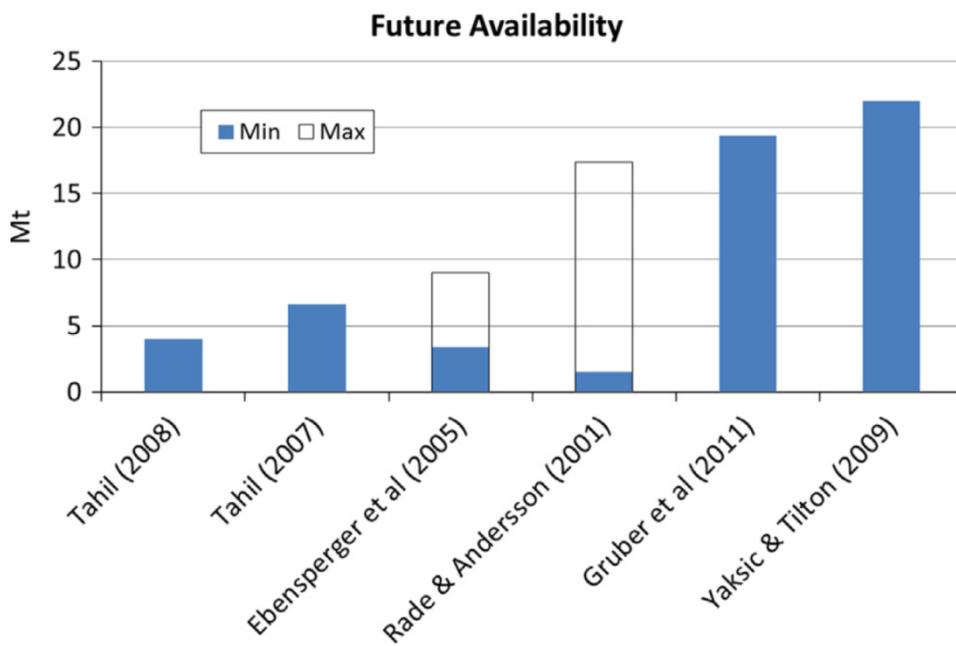
Usage

Nécessité de considérer toutes les étapes du cycle de vie d'un objet

# Les besoins en Lithium pour les batteries de VE



Source : J. Speirs et al. - Renewable and Sustainable Energy reviews – 35 (2014)



Source : J. Speirs et al. - Renewable and Sustainable Energy reviews – 35 (2014)

PAYS	EN MILLIONS DE TONNES
Bolivie	9
Chili	7,5
Chine	5,4
Etats-Unis d'Amérique	4
Argentine	2,6
Australie	1,8
Brésil	1
Congo (Kinshasa)	1
Serbie	1
Canada	0,36

Total des réserves estimées ~ 38 Mt

Source : « Lithium : nécessité et urgence d'introduire de nouveaux processus de collecte et de recyclage » GLOBAL 2000, Friends of the Earth Europe, Friends of the Earth England Wales and Northern Ireland. Février 2013

**Besoins 2030 : entre 50 et 300 k tonnes**

**Besoins 2050 : entre 200 et 1000 k tonnes (= 1Mt)**

- ⇒ une grande imprécision sur les estimations (réserves et besoins)
- ⇒ des réserves pas si « confortables » dans le cas d'un parc tout électrique
- ⇒ beaucoup incertitudes à lever !

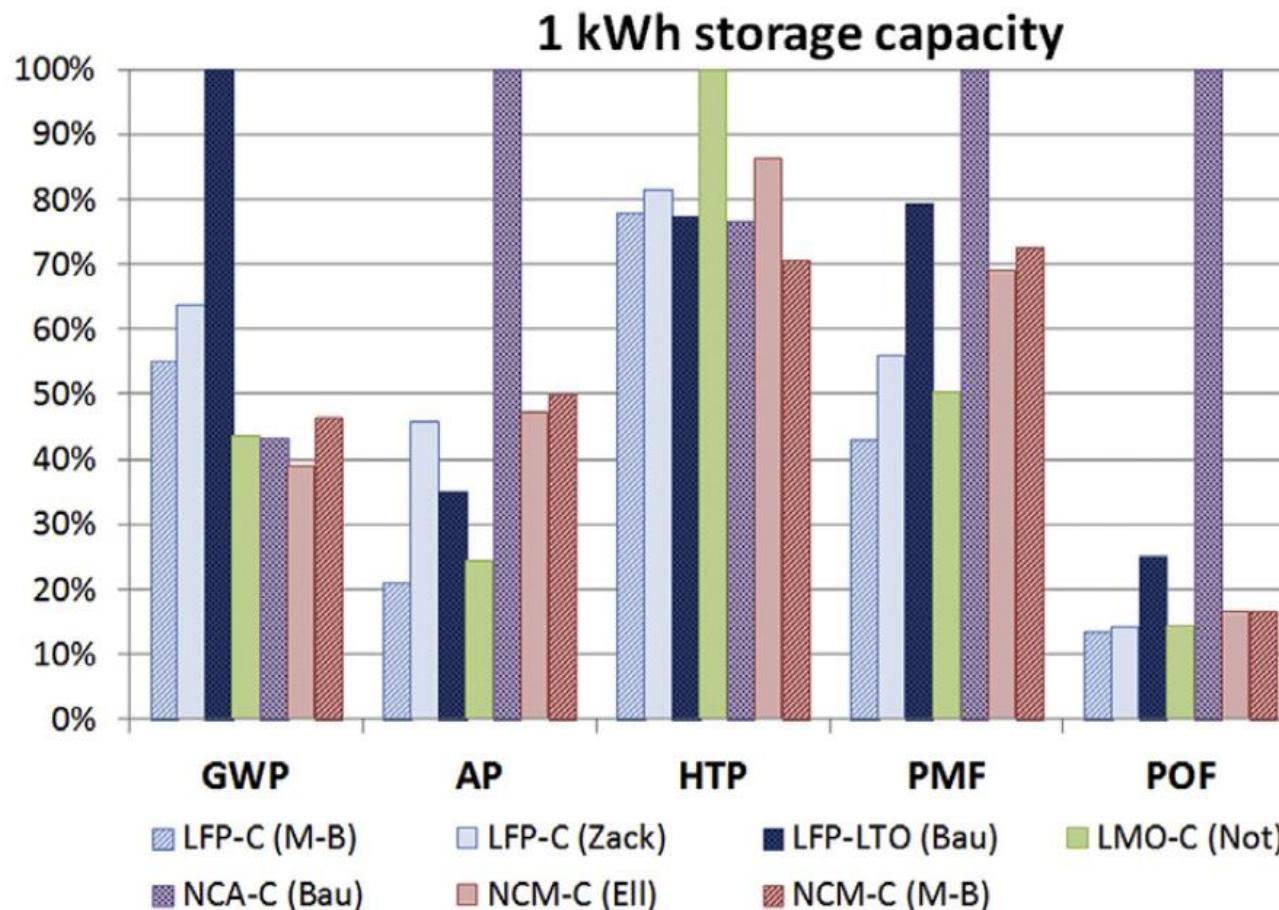
**Salar de Atacama (Chili)**

The extraction of lithium through evaporation of brines in salt flats **can have significant impacts on the often delicate balance of limited fresh and/or ground water supplies.** Comprehensive environmental impact assessment studies and monitoring is crucial to prevent, minimize and mitigate any negative impacts on the flora, fauna and ecosystems in the salars and the adjacent areas.

*Source : United Nations – Report on the sustainable development of lithium resources in latin America (2010)*

⇒ Des conflits existent actuellement au sujet des ressources en eau

# Bilan environnemental de la fabrication des batteries



GWP Global Warming Potential

AP Acidification potential

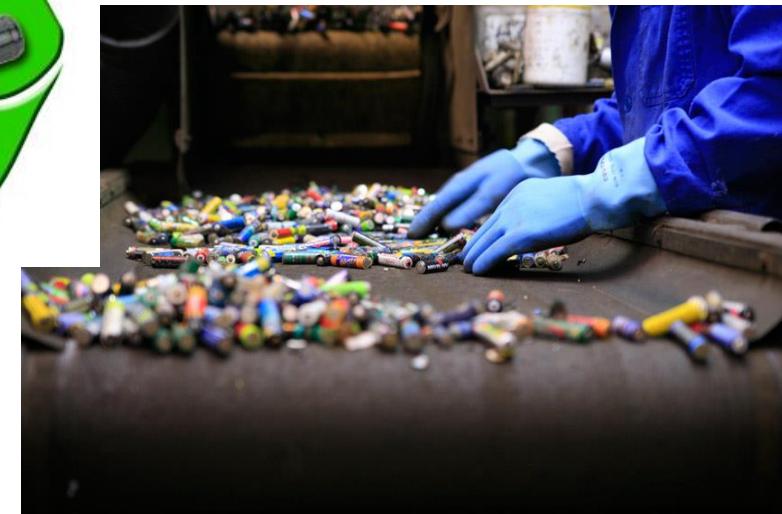
HTP Human Toxicity Potential

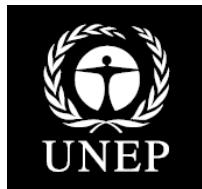
PMF Particulate matter formation/respiratory inorganics

POF Photochemical ozone formation

*Source : J. E. Peters, M. Weil ,  
Journal of Cleaner Production  
171 (2018)*

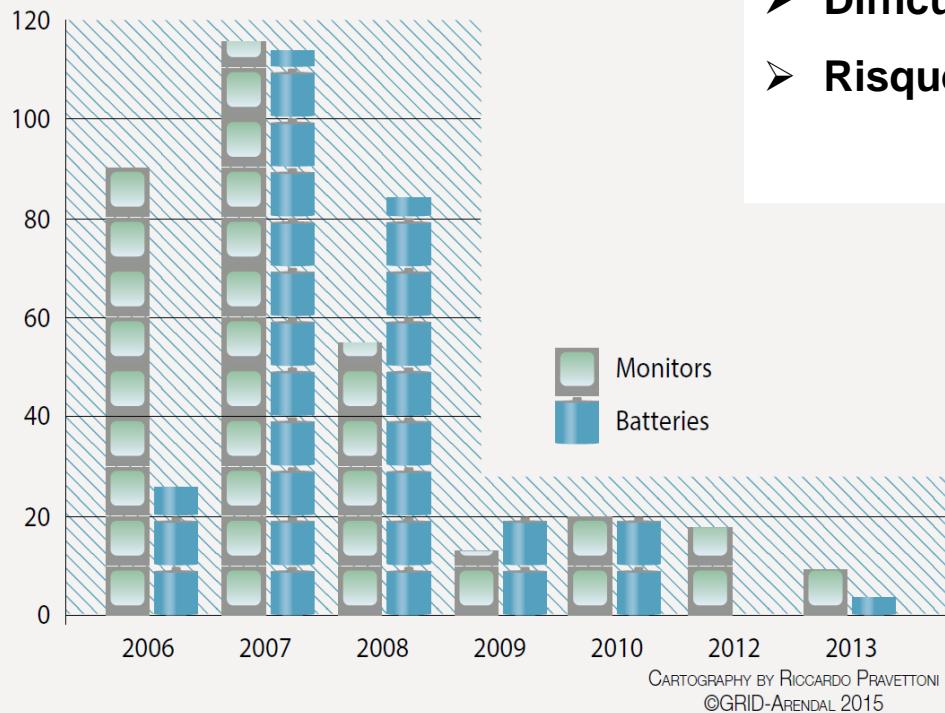
# Quel recyclage pour nos batteries ?





## Hong Kong's decline as an e-waste hub?

E-waste containers intercepted by Hong Kong customs



- Actuellement très faible flux de batteries de VE à recycler
- La faible teneur en Cobalt et/ou la multiplicité des chimies de batteries peut poser un problème de modèle économique
- Difficulté de la non « maturité » technologique
- Risque de transformation en « déchet »  
**(exemple des batteries au Plomb)**

**« .... De 2009 à 2011, 56 618 tonnes illégales de batteries au Plomb ont été saisies au Vietnam. ...»**

**Source: R. Nilsen, Waste crime – waste risks.  
United Nations Environment Programme  
2015**

# Récupération des piles et accumulateurs en France

année	portable			industriel		
	vendu (tonne)	récupéré (tonne)	taux récupération	vendu (tonne)	récupéré (tonne)	taux récupération
2016	<b>29491</b>	<b>13678</b>	<b>46%</b>	<b>55019</b>	<b>12702</b>	<b>23%</b>
2015	<b>31384</b>	<b>12296</b>	<b>39%</b>	<b>54504</b>	<b>12495</b>	<b>23%</b>
2014	<b>31300</b>	<b>11989</b>	<b>38%</b>	<b>51295</b>	<b>12104</b>	<b>24%</b>
<i>Données ADEME</i>						

## The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries

Source : M. Romare et al.  
Swedish Environmental Research Institute  
2017

“Based on the assessment of the posed questions, our conclusions are that the currently available data are usually not transparent enough to draw detailed conclusions about the battery’s production emissions.”

“In order to improve our understanding of the environmental impact of the battery production we need more than LCA results. We need more clear technical descriptions of each production step and where they are performed so that the emissions found in the reviewed life cycles assessments can be defined into different stages.”

- Des résultats différents suivant les technologies de batterie
- De très nombreuses incertitudes
- Des impacts qui ne peuvent pas être négligés

## Merci pour votre attention

Serge PELISSIER

Directeur de Recherche

Université Gustave EIFFEL – Campus de Lyon

[serge.pelissier@univ-eiffel.fr](mailto:serge.pelissier@univ-eiffel.fr)

## Contact

DAVID BENECH  
DIRECTEUR OPÉRATIONNEL  
06.81.04.14.29  
[David.Benech@ac-lyon.fr](mailto:David.Benech@ac-lyon.fr)



CAMPUS  
DES MÉTIERS  
ET DES  
QUALIFICATIONS  
**Auto'Mobilités**  
Auvergne-Rhône-Alpes



Université  
Gustave Eiffel



CARA  
AUVERGNE-RHÔNE-ALPES  
EUROPEAN CLUSTER  
FOR MOBILITY SOLUTIONS