



ASPROM, Paris, 2016

Séminaire « Stockage de l'énergie, quelles technologies ?
Pour quelles applications ? Pour quand ? »

Mise en œuvre des systèmes de stockage d'énergie électrique (batteries lithium-ion et supercondensateurs) : vers un BMS qui améliore leur durée de vie

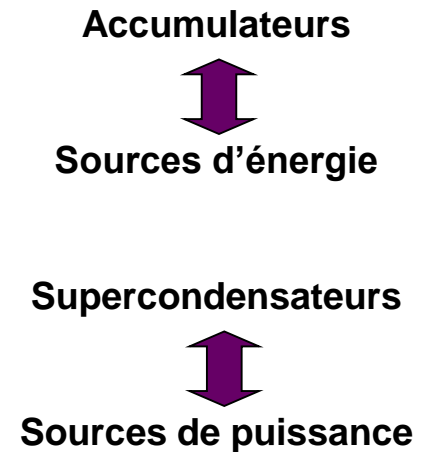
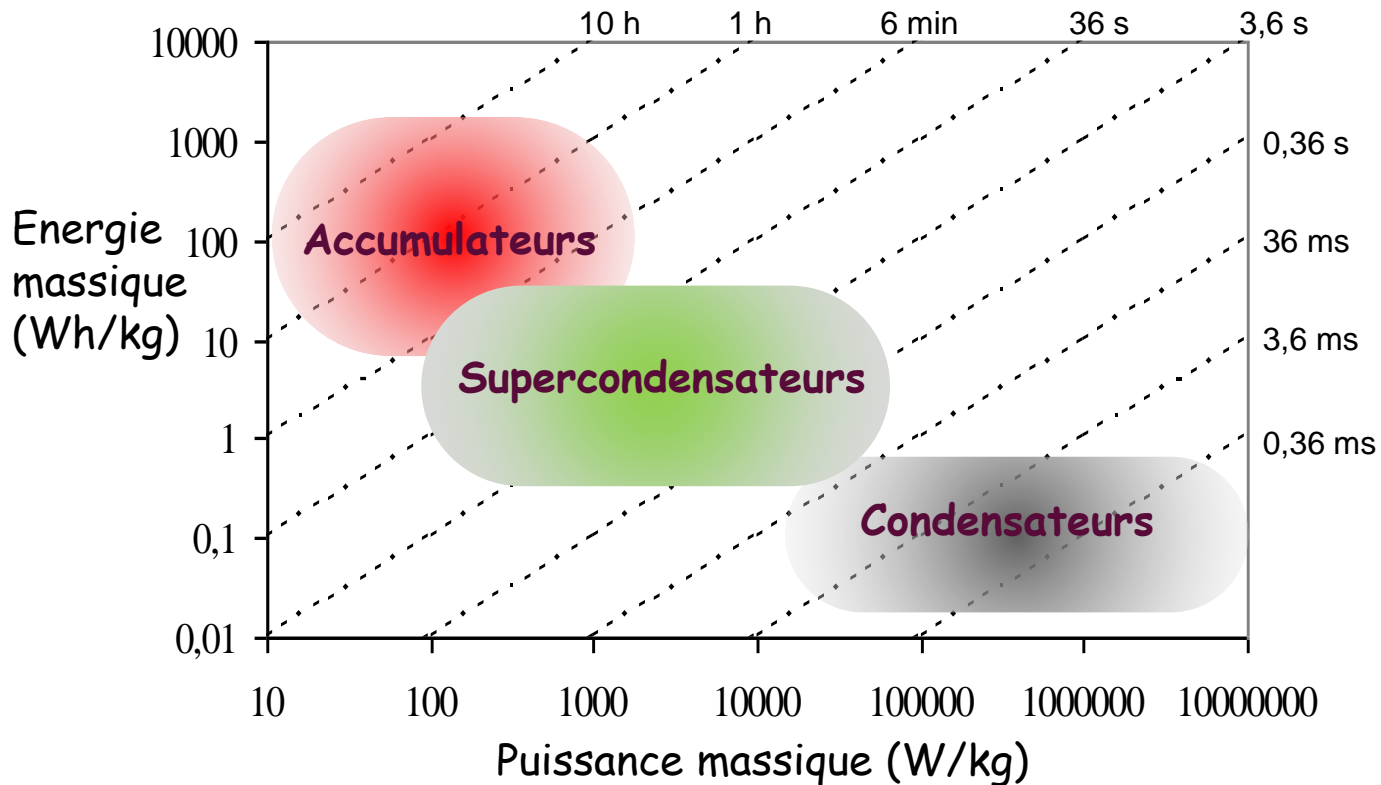
ASPROM / UIMM / CAP'TRONIC, Paris, 2016

Pascal VENET
pascal.venet@univ-lyon1.fr

- Présentation des systèmes de stockage considérés (batteries lithium-ion et supercondensateurs)
- Vieillessement et durée de vie des systèmes de stockage
- Assemblage des cellules
- Fonctions d'un BMS
- Équilibrages classique et original maximisant la durée de vie
- Conclusion

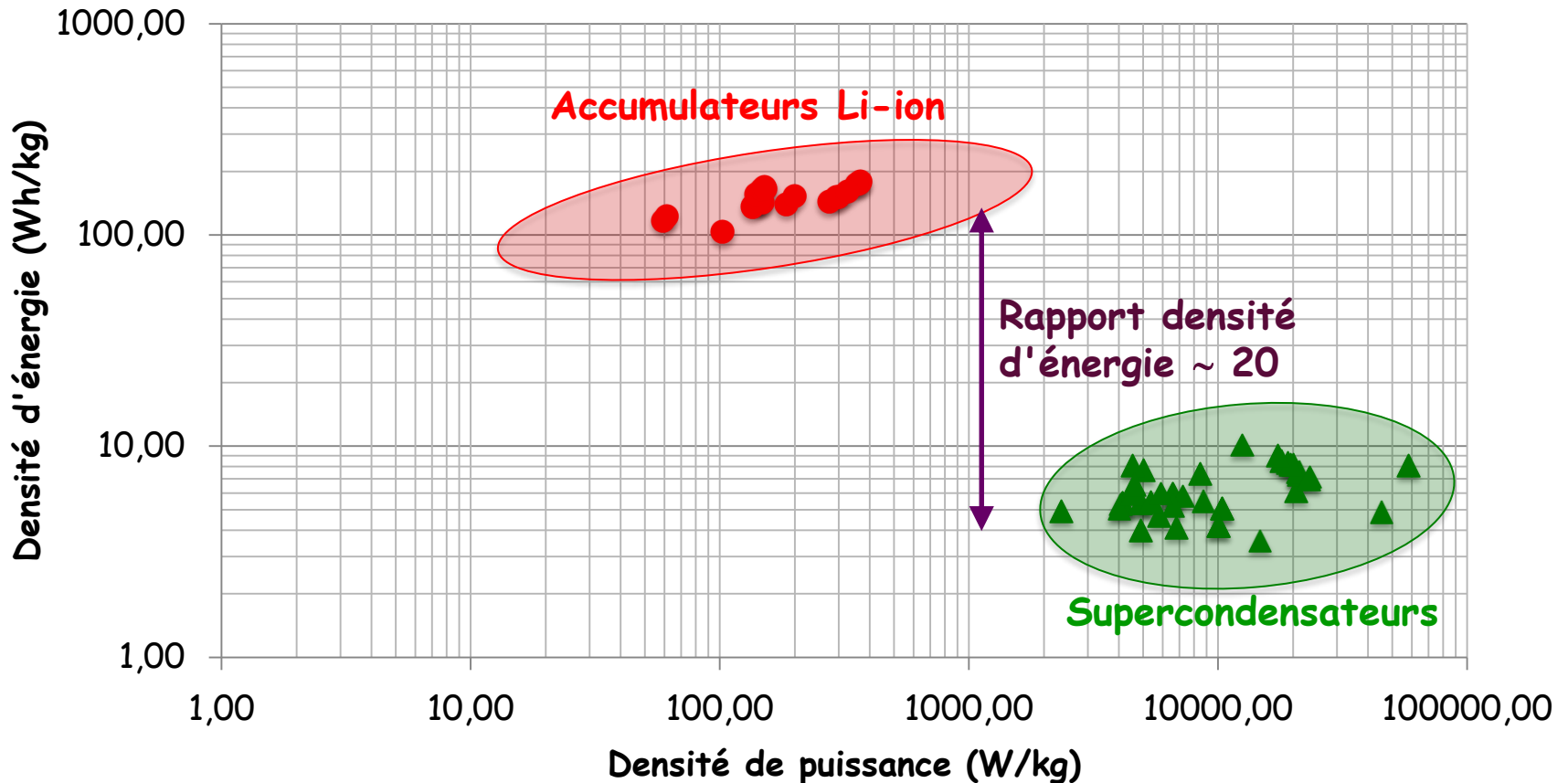
Présentation des systèmes de stockage d'énergie électrique (SSEE)

Diagramme de Ragone



Présentation des systèmes de stockage d'énergie électrique (SSEE)

Diagramme de Ragone

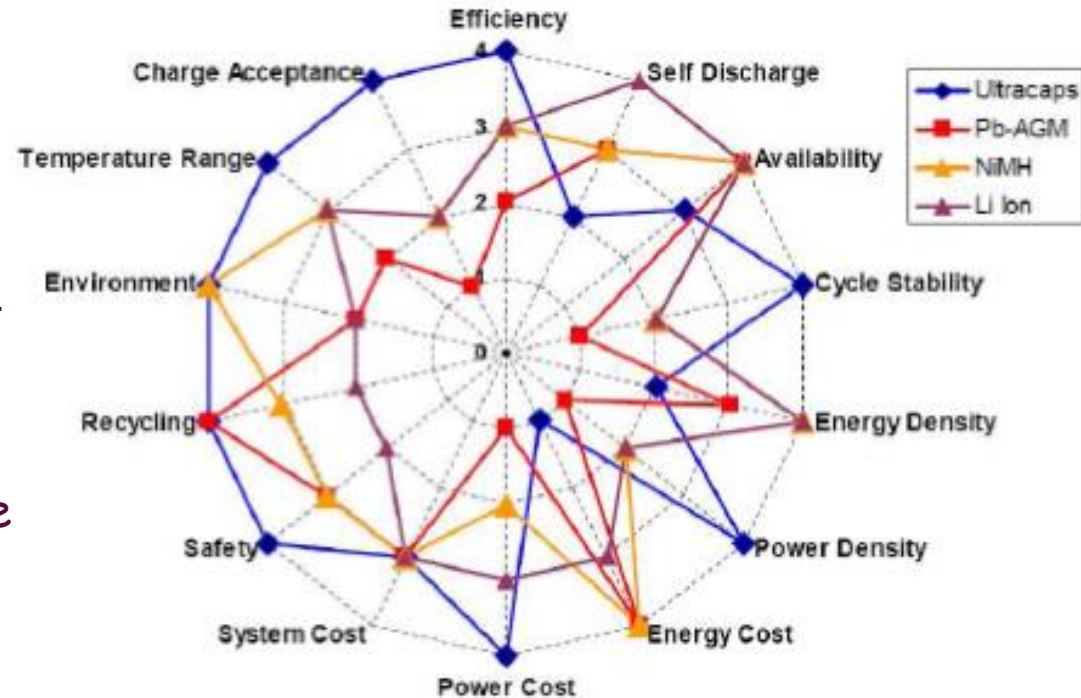


Présentation des systèmes de stockage d'énergie électrique (SSEE)

Avantages des accumulateurs lithium-ion

www.ineris.fr/centredoc/ve-technologies-batteries-couv-ineris.pdf

- ↪ Densité d'énergie élevée
- ↪ Autodécharge faible
- ↪ ...



Avantages des supercondensateurs

- ↪ Densité de puissance élevée
- ↪ Durée de vie (cyclabilité) élevée (plusieurs 100 000 à 1 000 000 de cycles)
- ↪ ...

Remarque cyclabilité : nombre de cycles = cycles après charges/décharges complètes (~ qq 1000 cycles annoncés pour batterie Li-ion peut correspondre à ~ qq 10 000 ou qq 100 000 cycles si utilisation batterie autour de 50 % de SOC (~ 40 à 60 % de SOC comme pour véhicule hybride))

Batterie lithium-ion ou supercondensateurs : des applications différentes...

Exemple pour un véhicule

↳ Véhicule électrique

Batterie lithium-ion



	< 2016	≥ 2016
	16 kWh	-
	22 kWh	41 kWh
	-	60 kWh
	24 kWh	30 kWh

... pour une autonomie courante autour des 400 km (mondial de l'automobile 2016)

Batterie lithium-ion, supercondensateurs : des applications différentes...

Exemple pour un véhicule

↪ **Micro-hybridation véhicule (Stop & Start)**

Supercondensateurs

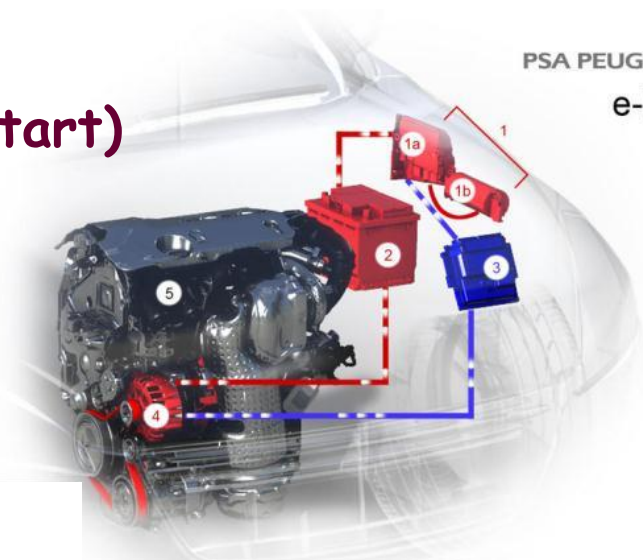
Système e-Hdi PSA : 2 superC de 1200 F

- Citroën C2, C3, C4, C5
- Peugeot 208, 308, 508, 3008

Système i-ELOOP Mazda

- Mazda 3 et 6

PSA PEUGEOT CITROËN
e-HDi



12-25V variable voltage alternator

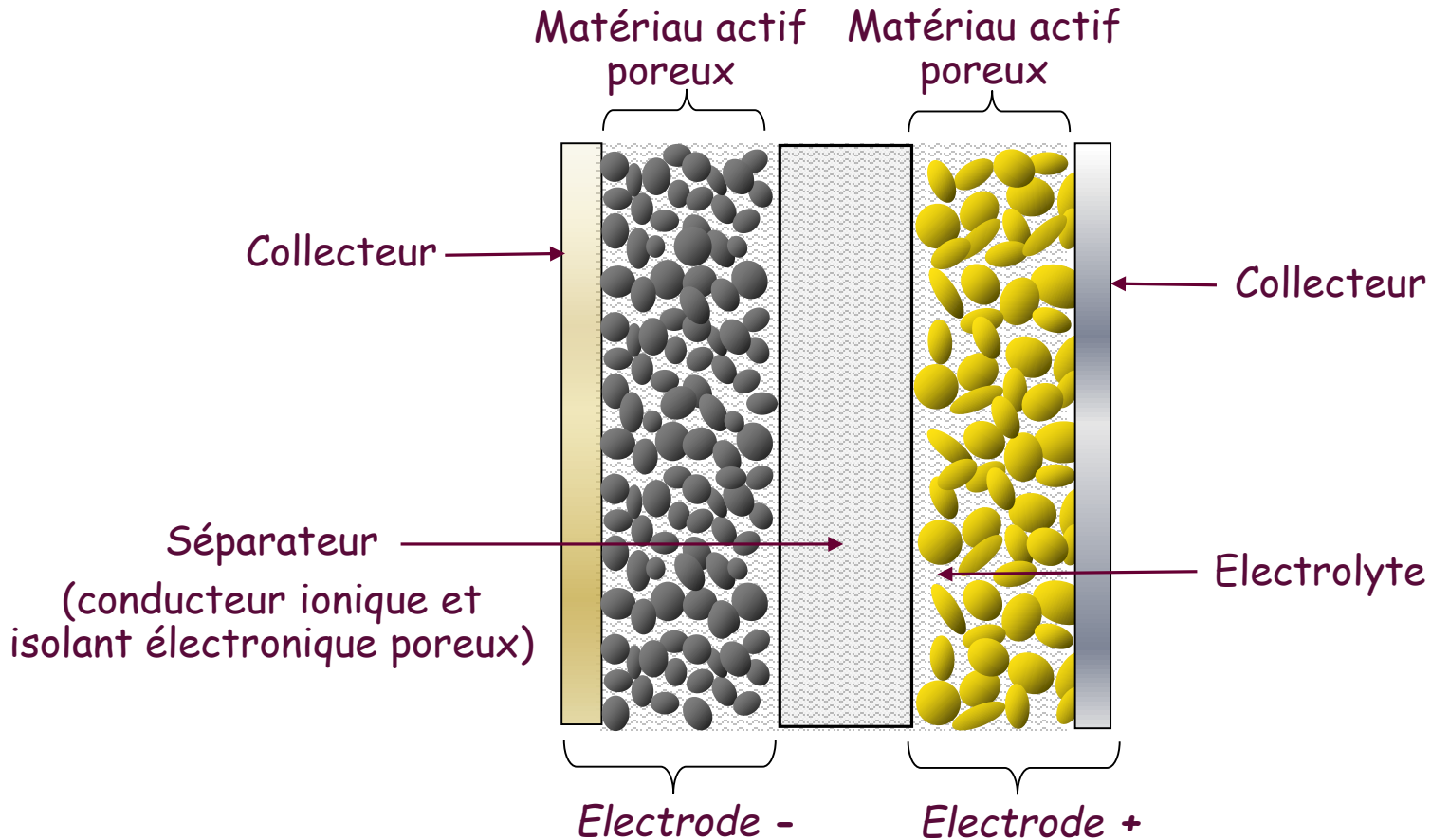
DC/DC Converter



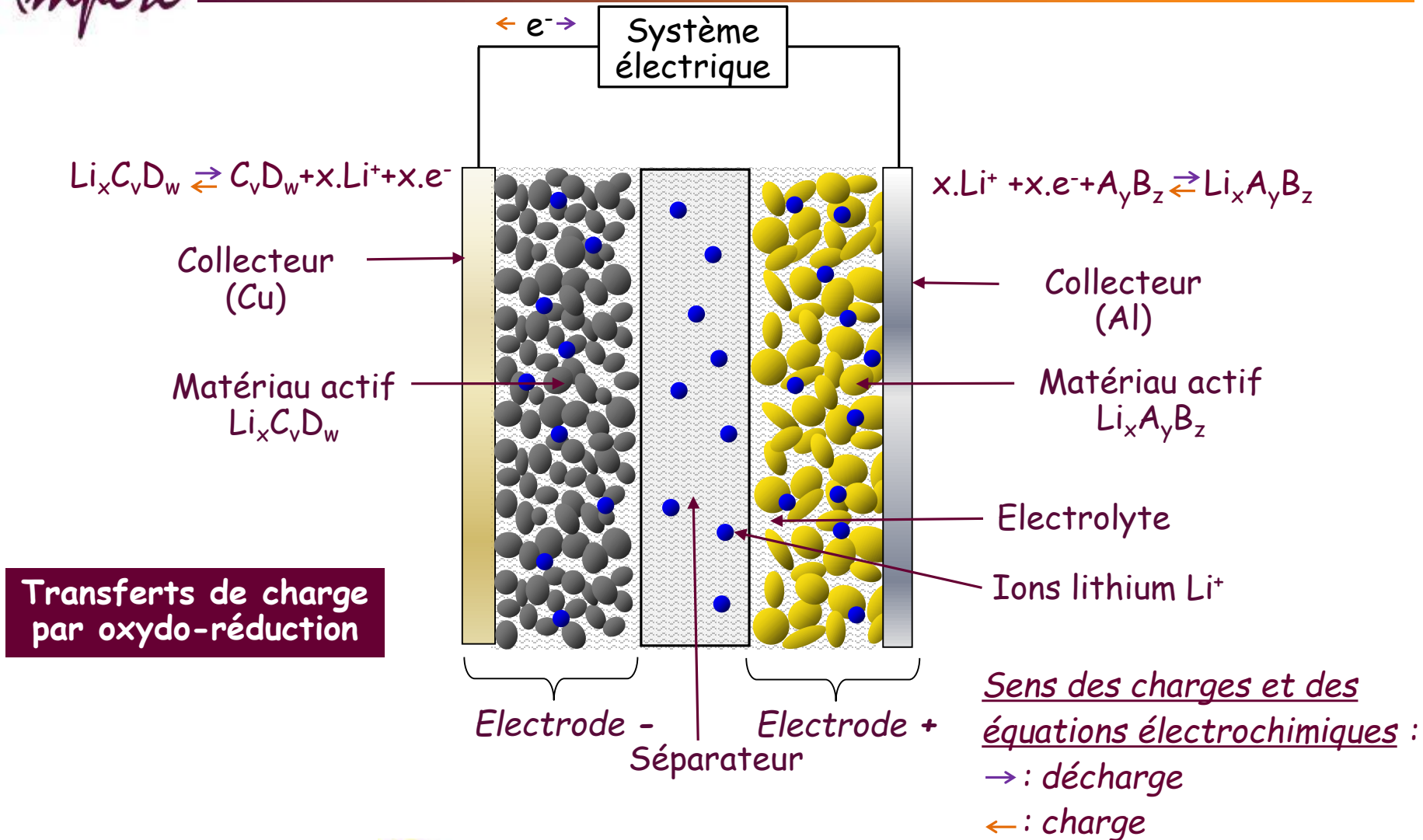
Electric Double Layer Capacitor

Présentation des systèmes de stockage d'énergie électrique (SSEE)

Constitution semblable entre accumulateurs et supercondensateurs



Principe des accumulateurs lithium-ion



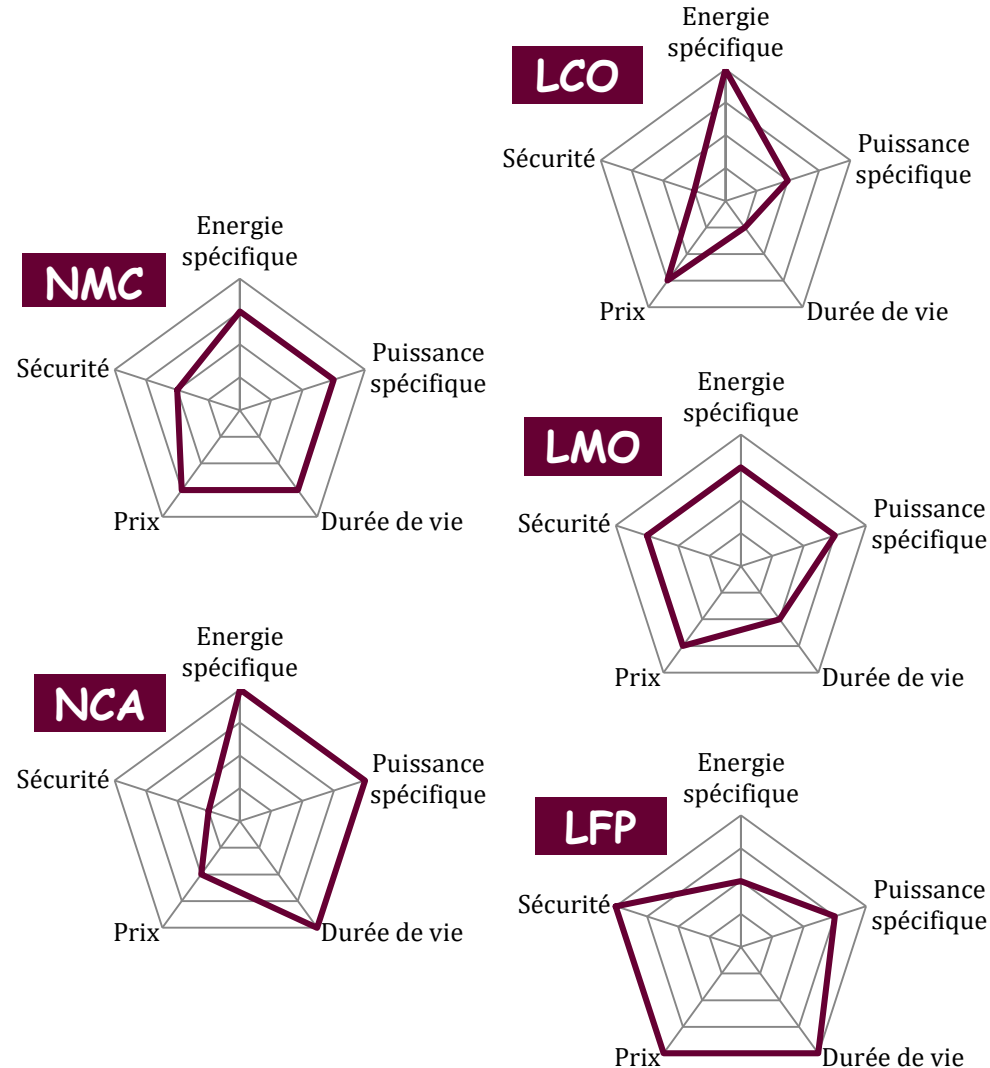
Différentes chimies usuelles d'accumulateurs lithium-ion

Electrode négative -: $Li_xC_yD_w$

- ↳ Usuellement graphite lithié LiC_6
- ↳ Titanates (LTO) ($Li_4Ti_5O_{12}$ par ex.)

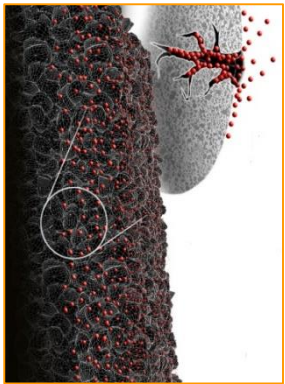
Electrode positive +: $Li_xA_yB_z$

- ↳ Dioxyde de Cobalt (LCO) ($LiCoO_2$)
- ↳ Nickel-Cobalt-Manganèse (NMC) ($LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$ par ex.)
- ↳ Lithium Manganèse Oxyde (LMO) ($LiMn_2O_4$ par exemple)
- ↳ Nickel-Cobalt-Aluminium (NCA) ($LiNi_{0.8}Co_{0.16}Al_{0.06}O_2$ par ex.)
- ↳ Lithium Fer Phosphate (LFP) ($LiFePO_4$)

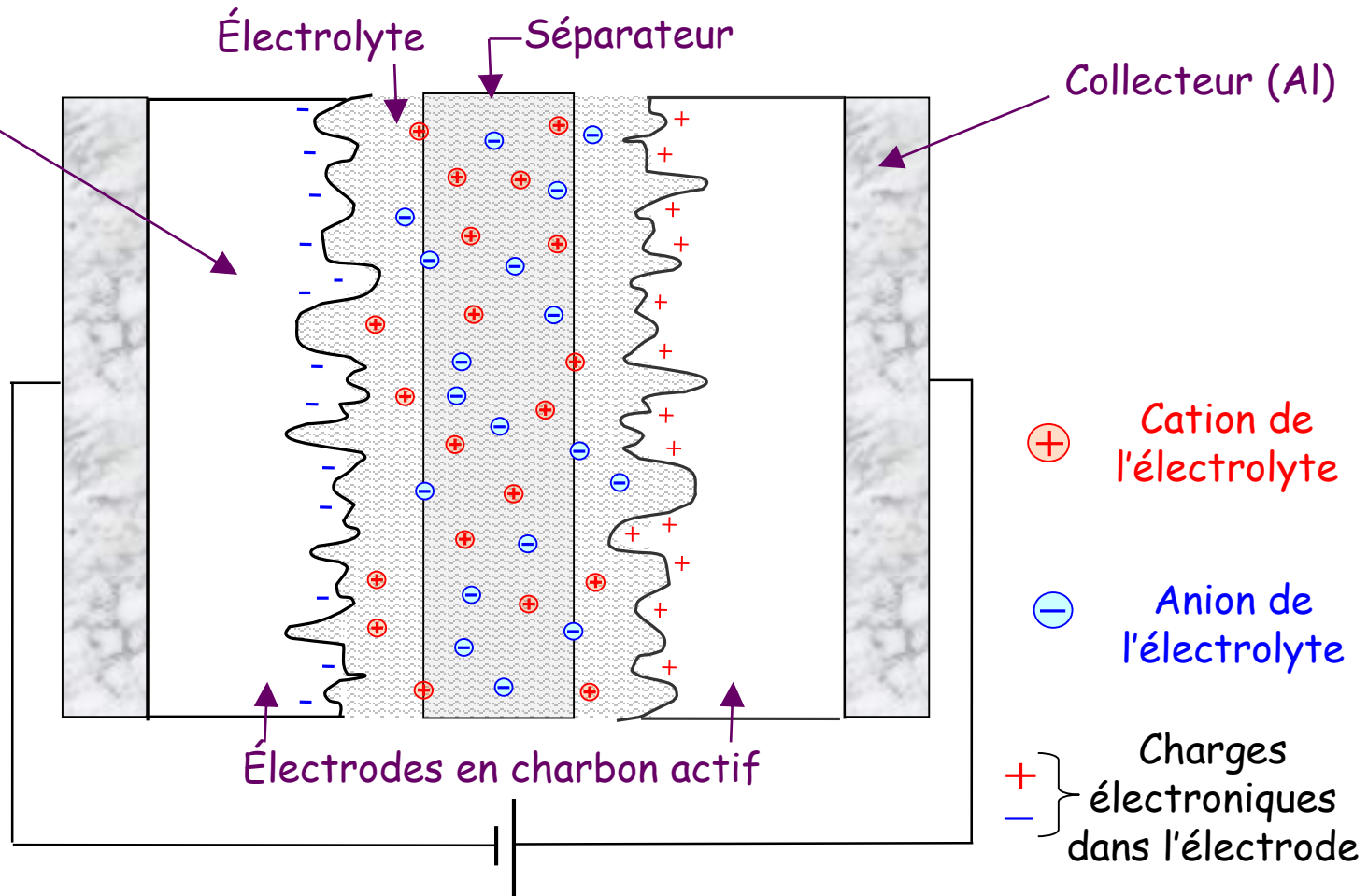


Principe des supercondensateurs à double couche électrique

Charbon actif

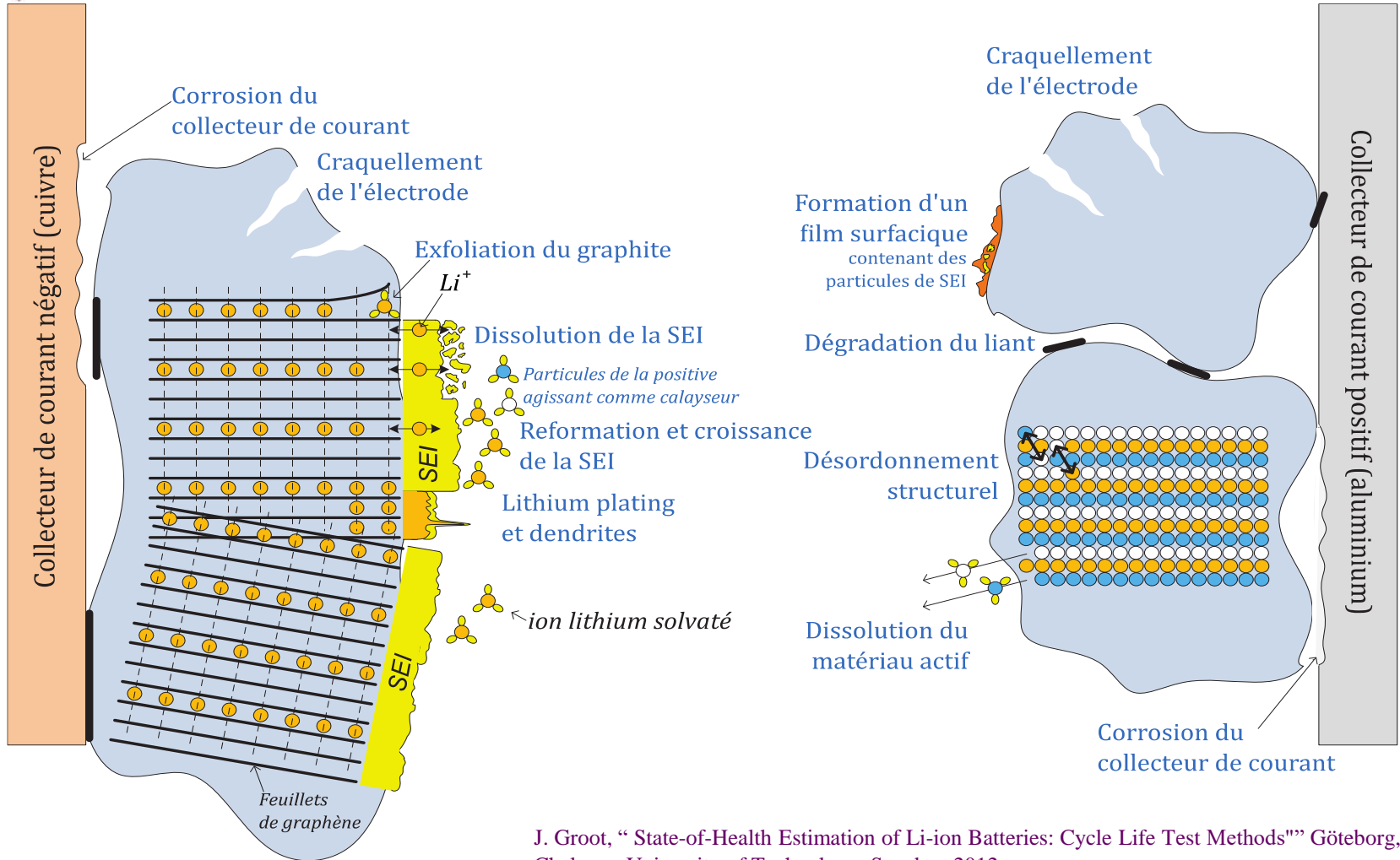


(Credit: EnerG2)



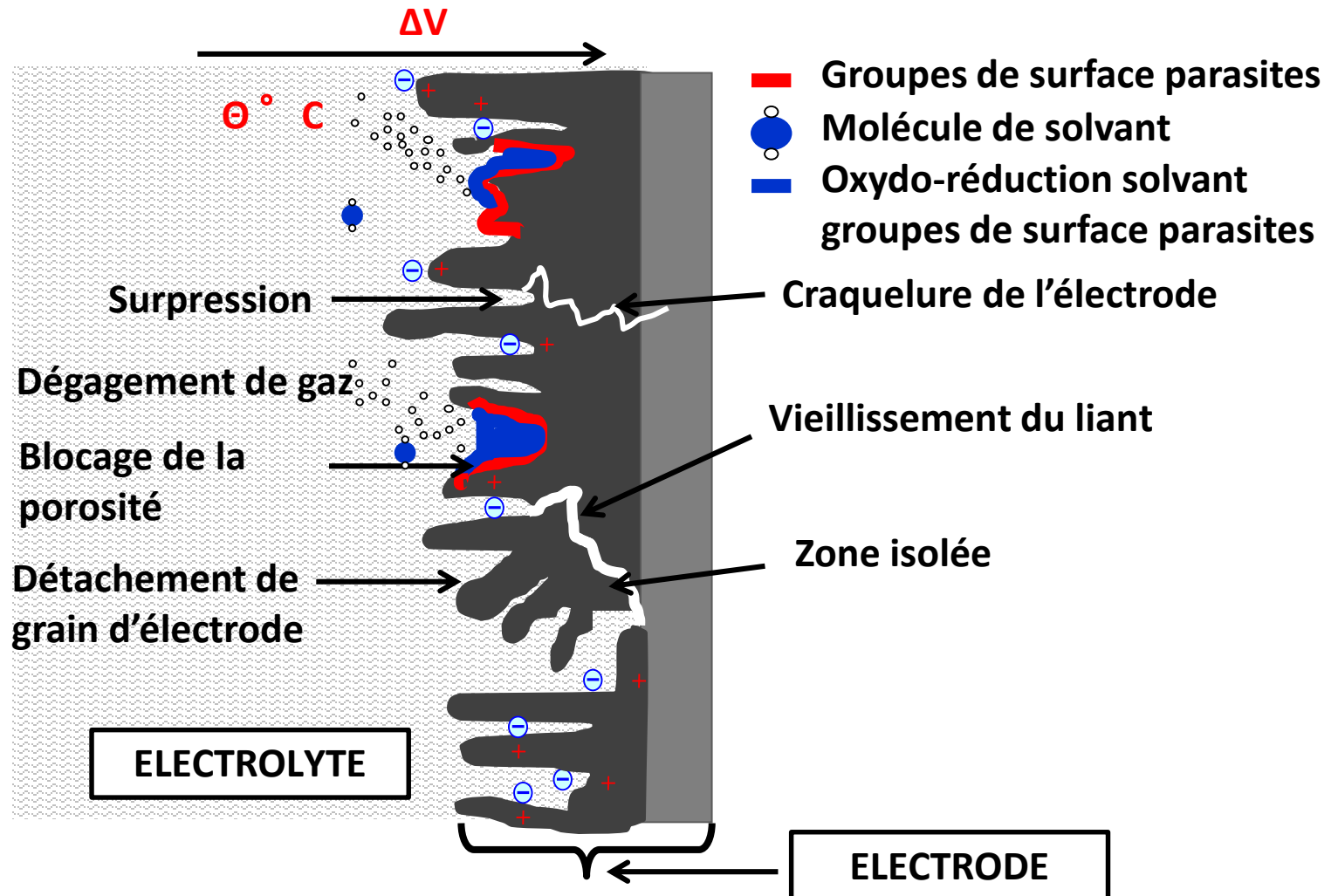
Pas de transfert de charges mais interactions électrostatiques

Vieillesse des accumulateurs lithium-ion



J. Groot, "State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Cycle Life Test Methods" Göteborg, Thesis Chalmers University of Technology, Sweden, 2012

Vieillessement des supercondensateurs à double couche électrique



Mécanismes et modes de dégradation des SSEE



Causes

- ↗ Structurelles
- ↗ Chimiques et/ou thermodynamiques

Conséquences

- ↗ Diminution de la capacité
 - $\searrow C(\text{Ah})$ pour accumulateurs
 - $\searrow C(\text{F})$ pour supercondensateurs
- ↗ Augmentation de l'impédance série
 - ↗ Z_s ou
 - ↗ ESR (Equivalent Series Resistance)

Cinétique dépendante de :

- ↗ Température (loi d'Arrhenius)
- ↗ Etat de charge
 - SOC pour accumulateurs
 - Tension pour superC
- ↗ Régime (valeurs de courant)
- ↗ ...

2 types de vieillissement

- ↗ Calendaire : SSEE au repos (température et état de charge donnés)
- ↗ Cyclage : SSEE en usage (charge/décharge en courant)

Exemples de modèles de durée de vie des SSEE



Critères de fin de vie usuellement admis

↘ $C(t)$ jusqu'à $C(t) = 0,8.C(0)$

↗ ESR(t) jusqu'à $ESR(t) = 2.ESR(0)$

Estimation durée de vie = temps jusqu'à ce que l'un des critères de fin de vie soit atteint

Supercondensateurs

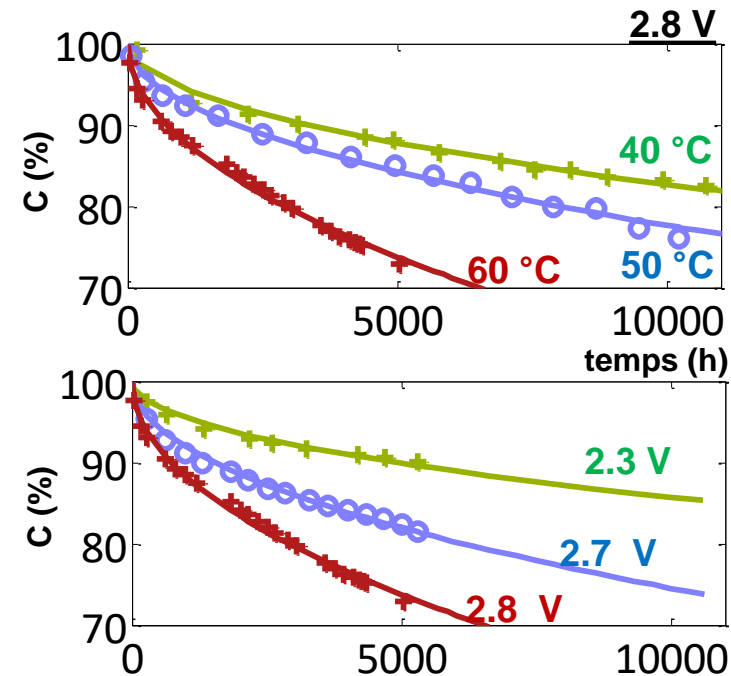
Loi d'Eyring : Généralise la loi d'Arrhenius à d'autres contraintes

↘ Durée de vie τ si contraintes T_{SC} , V_{SC} , I fixes

$$\tau(T_{SC}, V_{SC}, \dots) = \tau_0 \cdot e^{\left(-\frac{T_{SC}}{T_0}\right)} \cdot e^{\left(-\frac{V_{SC}}{V_0}\right)} \cdot e^{\left(-\frac{I_{eff}}{I_0}\right)} \dots$$

↘ Durée de vie τ si contraintes variables $T_{SC}(t)$, $V_{SC}(t)$, $I_{SC}(t)$

$$\tau(V_{SC}(t), T_{SC}(t), I_{eff}(t)) = \frac{(t_f - t_i)}{\frac{1}{\tau_0} \cdot \int_{t_i}^{t_f} e^{\left(\frac{V_{SC}(t)}{V_0} + \frac{T_{SC}(t)}{T_0} + \frac{I_{eff}(t)}{I_0}\right)} dt}$$



T_{SC} : température instantanée du SC [°C]
 V_{SC} : tension instantanée du SC [V]
 I_{eff} : courant efficace du SC [A]
 $[t_i, t_f]$: l'intervalle de temps de l'analyse

Exemples de modèles de durée de vie des SSEE

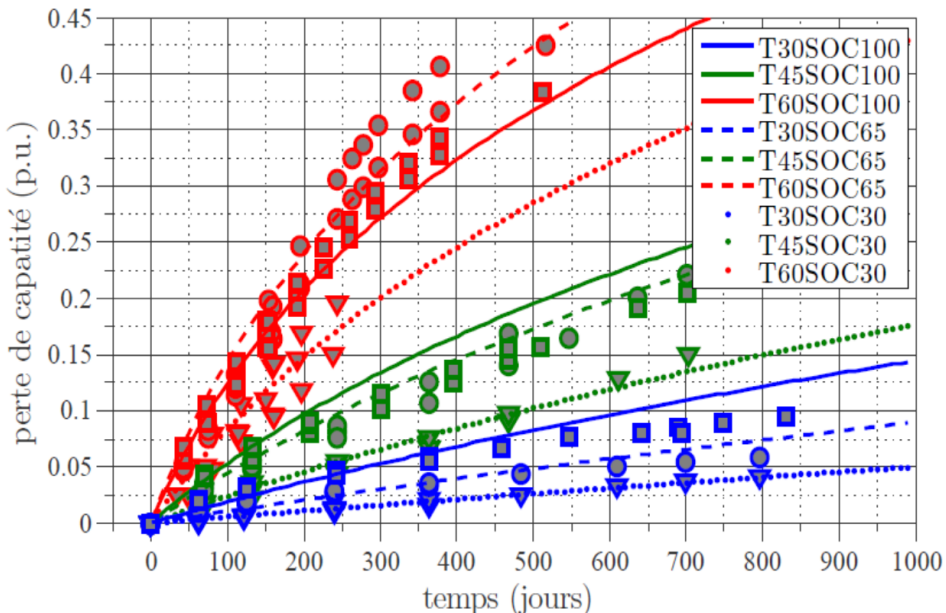


Batterie lithium-ion

Vieillessement calendaire

Perte de capacité Q_L VS quantité de charge disponible Q_a (image du SOC)

$$Q_L = A \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{k.T} + B \cdot Q_a\right)} \cdot t$$

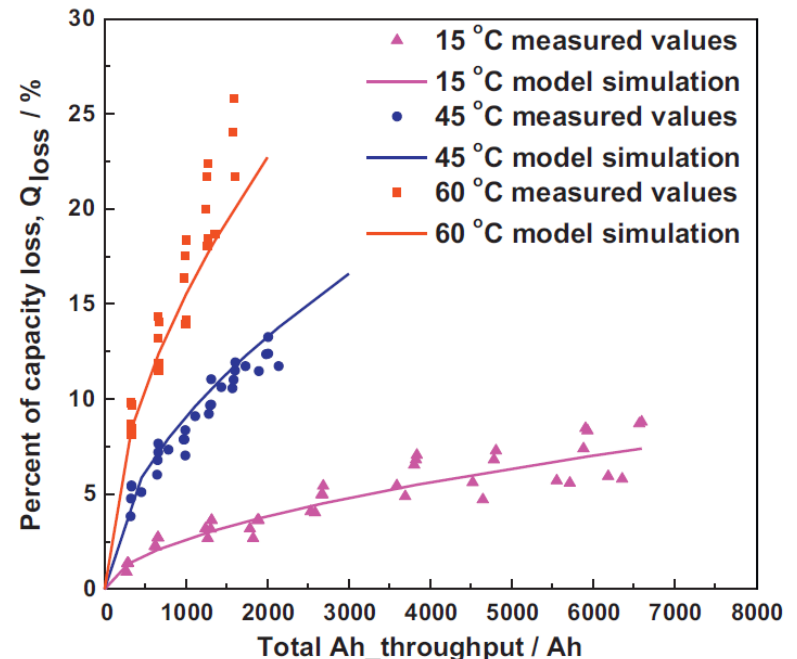


E. Redondo et al « Modélisation du vieillissement calendaire de cellules lithium-ion (graphite/LiFePO4) avec prise en compte de la dérive de leur état de charge » SGE 2016

Vieillessement par cyclage

Perte de capacité Q_L VS taux de décharge C_{rate} et des Ah échangés

$$Q_L = B \cdot e^{\left(\frac{-A+B \cdot C_{rate}}{k.T}\right)} \cdot A_h^\alpha$$

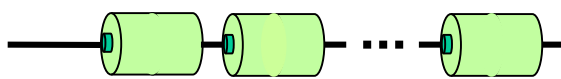


J. Wang et al "Cycle-life model for graphite-LiFePO4 cells," J. Power Sources (2011)

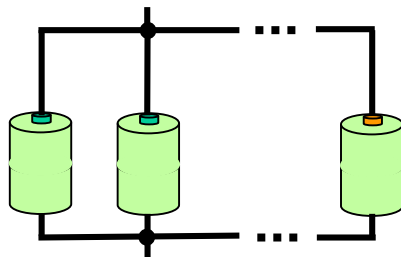
Assemblage des cellules



Série



Parallèle



Augmenter la tension

⚡ Tension max. unitaire :

- des cellules Li-ion < 4.2V
- des supercondensateurs : < 3V

⚡ Tension du pack : >> qq 10 V

Augmenter la capacité

⚡ Diminuer le courant / cellule

- Réduire les pertes ohmiques
- Baisser la température

Dispersion des caractéristiques entre chaque composant dues :

- ↪ aux tolérances sur les paramètres compte tenu du procédé de fabrication
- ↪ à la différence de température à laquelle peuvent être soumis des composants d'un même module



Photo de la face instrumentée d'un module de supercondensateur

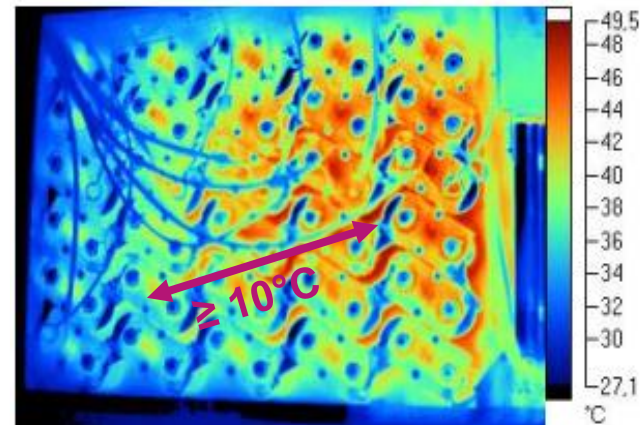
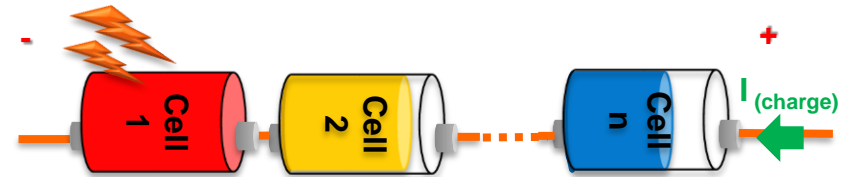
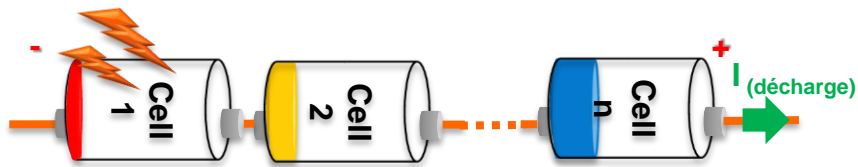


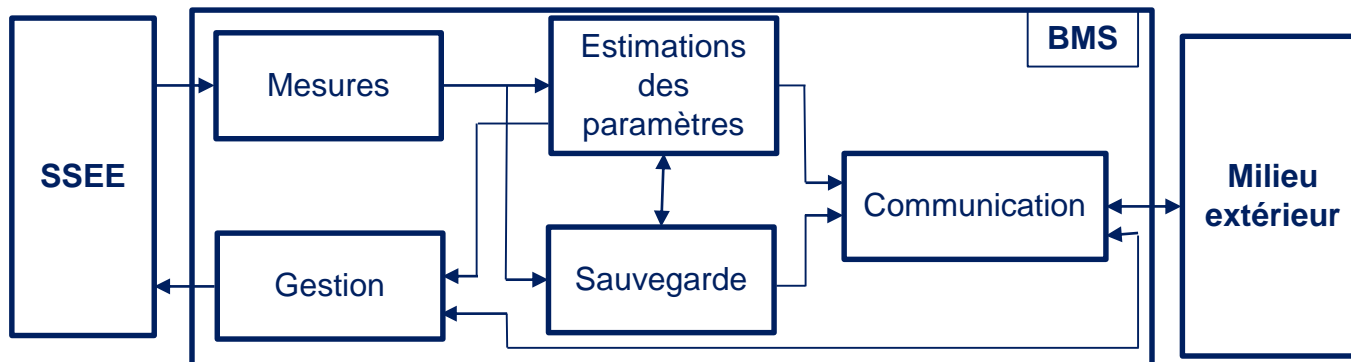
Photo thermique d'un module de supercondensateur

- ↪ à la non similitude du vieillissement entre les composants d'un même module

⇒ Risques pour le système et l'utilisateur

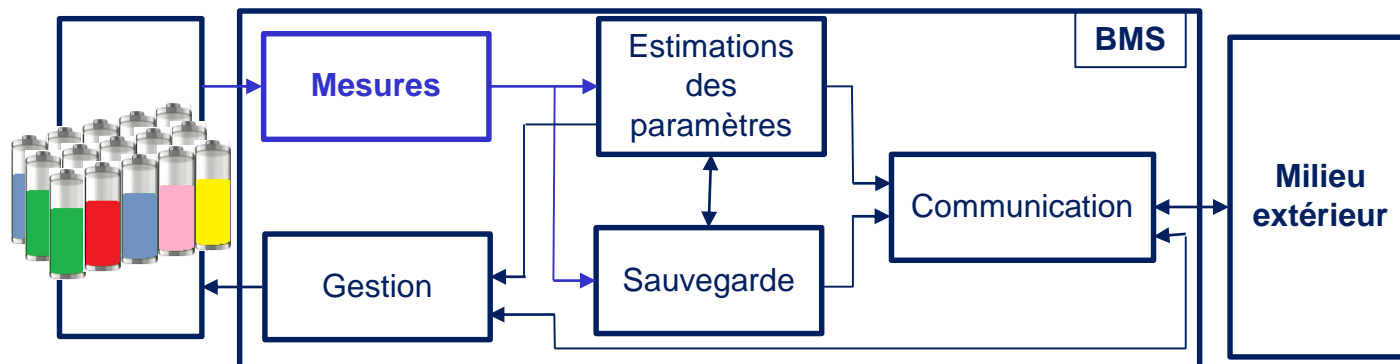
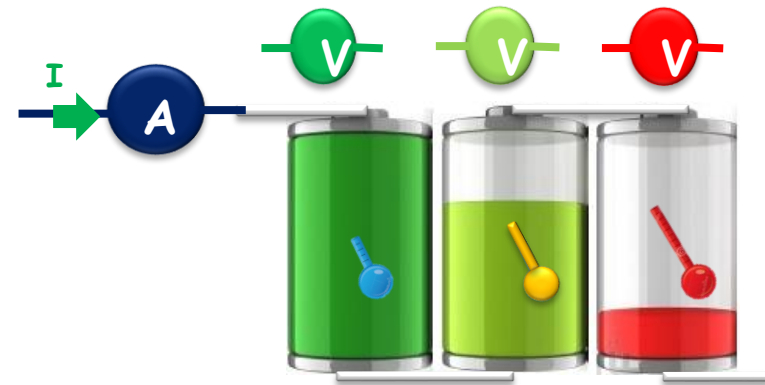


⇒ Nécessité d'associer un système de gestion d'énergie BMS (ou SMS pour supercondensateurs)



Fonctionnalités

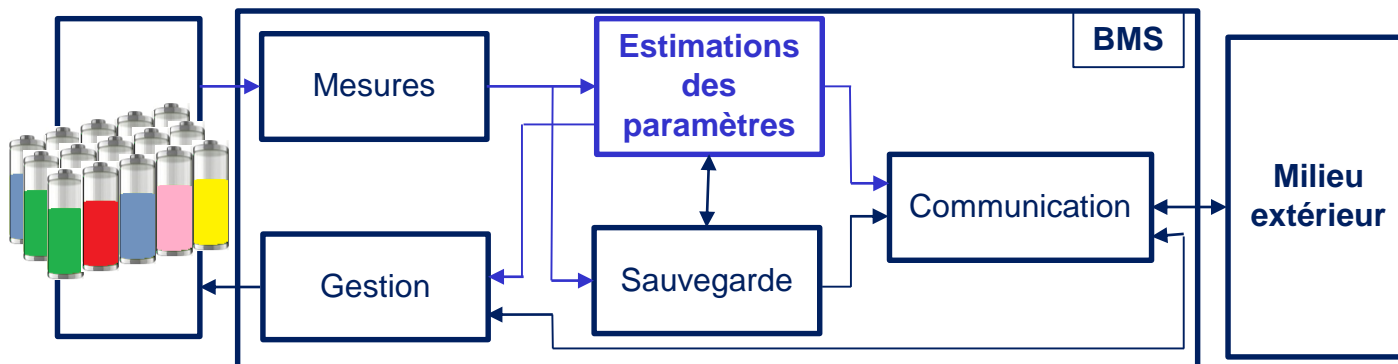
- ↪ Mesures (V, I, T)
- ↪ Estimations des paramètres
- ↪ Gestion
- ↪ Sauvegarde
- ↪ Communication



Fonctionnalités

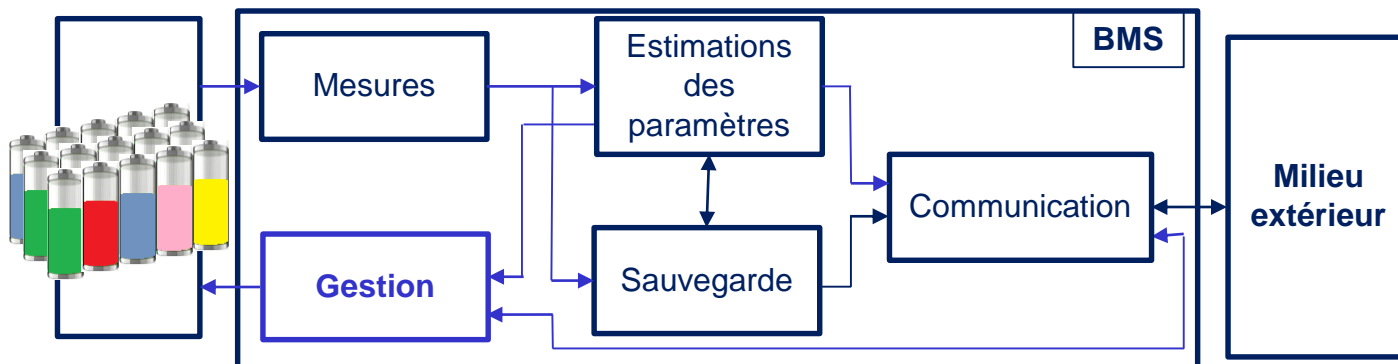
- ↪ Mesures (V, I, T)
- ↪ Estimations des paramètres
 - $C(t)$, ESR(t), ...
 - SOC(t), SOH(t), ...
- ↪ Gestion
- ↪ Sauvegarde
- ↪ Communication

Estimateurs
Observateurs



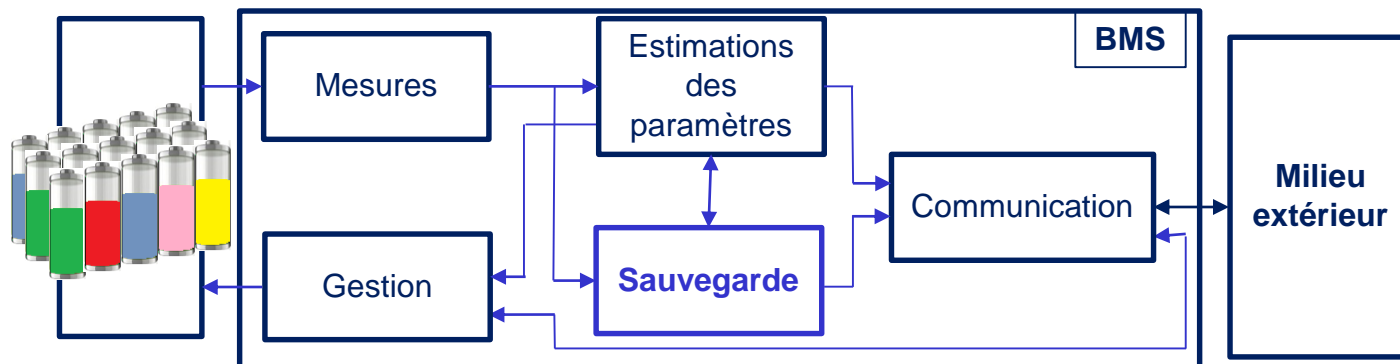
Fonctionnalités

- ↪ Mesures (V, I, T)
- ↪ Estimations des paramètres
- ↪ Gestion
 - Sécurité / Thermique / Equilibrage
- ↪ Sauvegarde
- ↪ Communication



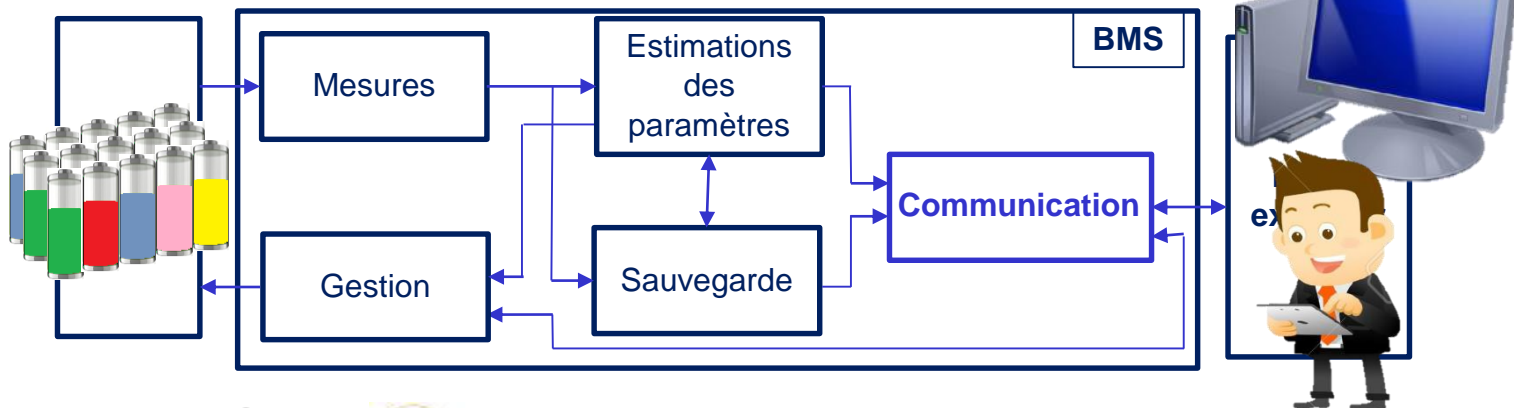
Fonctionnalités

- ↪ Mesures (V, I, T)
- ↪ Estimations des paramètres
- ↪ Gestion
- ↪ Sauvegarde
 - V(max/min), I(max/min), T(max/min), ESR(t), C(t)
- ↪ Communication



Fonctionnalités

- ↪ Mesures (V, I, T)
- ↪ Estimations des paramètres
- ↪ Gestion
- ↪ Sauvegarde
- ↪ **Communication**

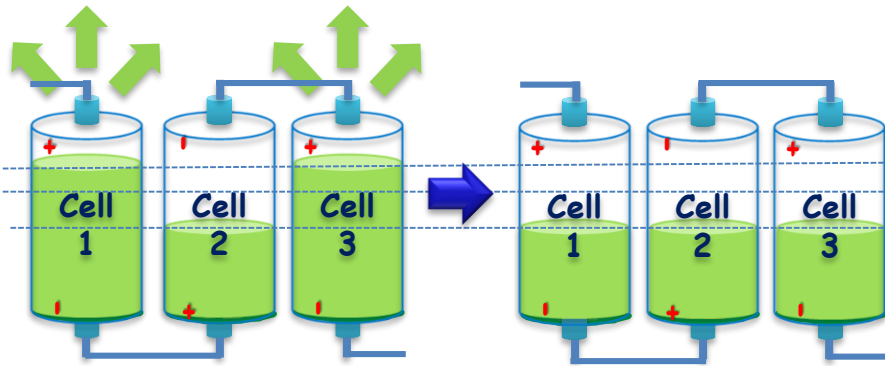




Equilibrage des tensions : circuits d'équilibrage

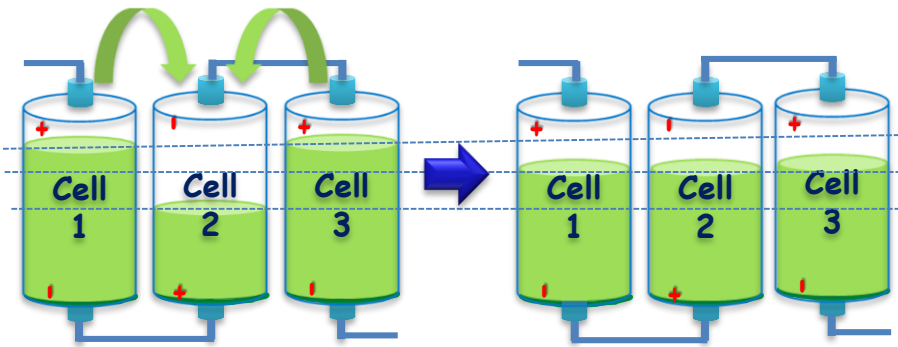
- ↪ Egalise les tensions entre éléments
- ↪ Protège les éléments de la surcharge et la sur-décharge

Equilibrage dissipatif



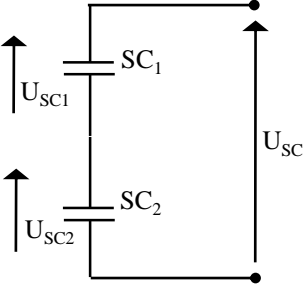
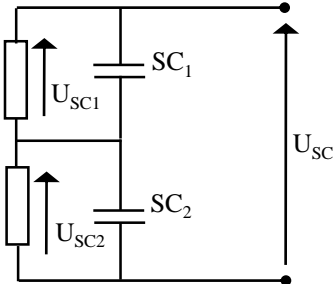
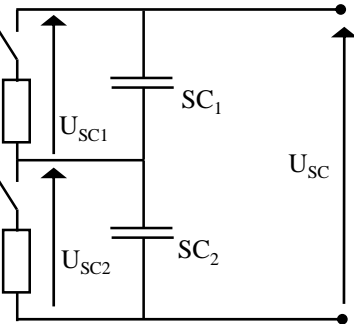
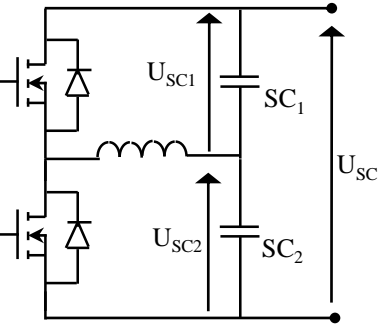
- ↪ Circuits d'équilibrage dissipatif
 - Résistif
- ↪ Rendement énergétique (faible)
- ↪ Coût (acceptable)

Equilibrage redistributif



- ↪ Circuits d'équilibrage redistributif
 - Capacitif ou inductif ou avec transformateur
- ↪ Rendement énergétique (bon)
- ↪ Coût (élevé)

Exemple : équilibrage de supercondensateurs

Type de Système d'équilibrage	Sans système d'équilibrage	Circuit dissipatif avec $R=50 \Omega$	Circuit dissipatif commandé avec $R \approx 1 \Omega$	Convertisseur Buck-Boost
<p>Capacité de $SC_1=C$</p> <p>Capacité de $SC_2=0,8.C$</p>				
Durée de vie du module	1,4 années	3,5 années	6,0 années	6,0 années
η énergétique %	100	77	91	93
Coût	Faible	Faible	Acceptable	Elevé

Vers un équilibrage des durées de vie des cellules

Dans un assemblage de cellules :

- ↪ Dispersion des tensions (résolue grâce à la fonction d'équilibrage du BMS)
- ↪ Dispersion de températures (plus de 10 °C)
 - Dispersion des vitesses de dégradation
 - A tension égale le module reste limité par son élément le plus faible

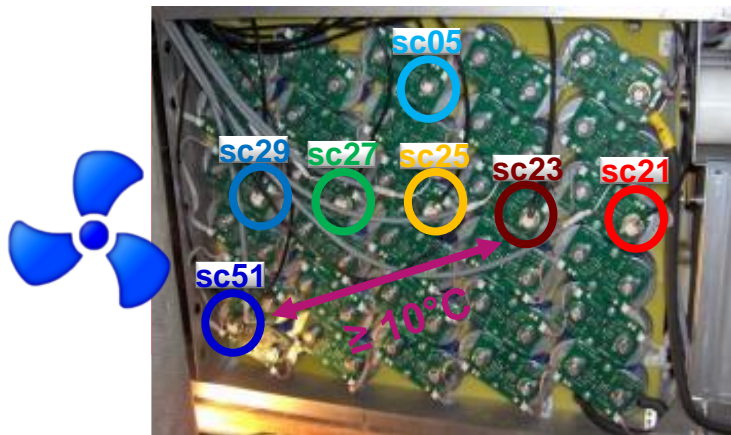
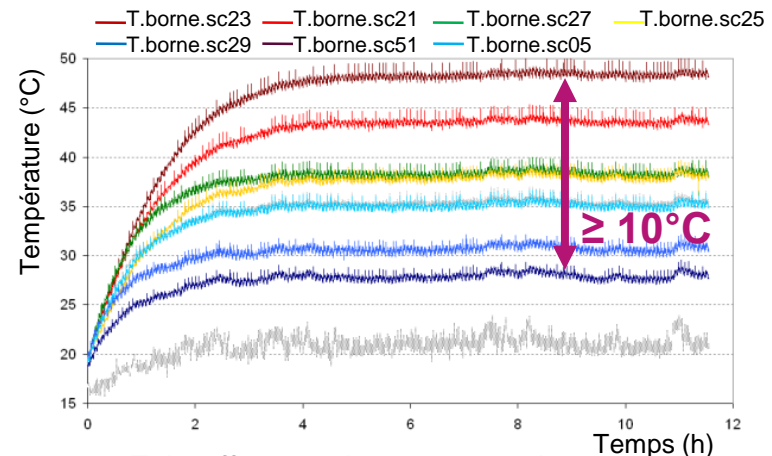


Photo de la face instrumentée du module de stockage

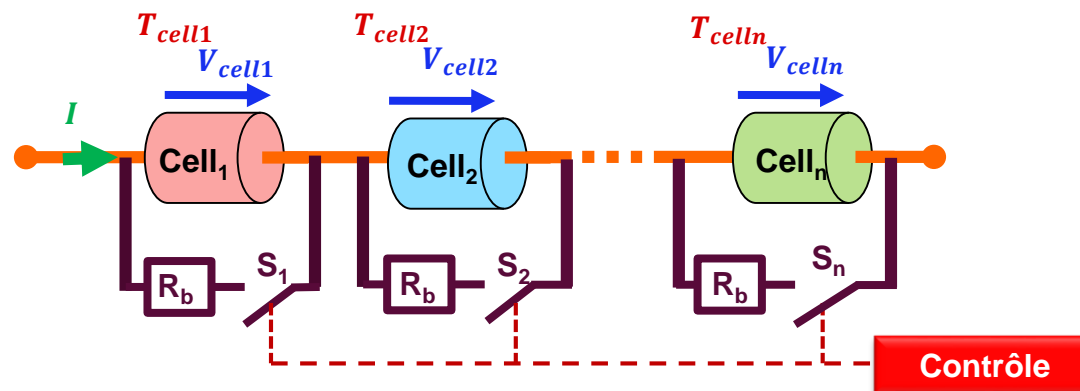


Echauffement des supercondensateurs instrumentés

Vers un équilibrage des durées de vie des cellules

Contrôler les circuits d'équilibrage en vue d'améliorer la durée de vie des supercondensateurs

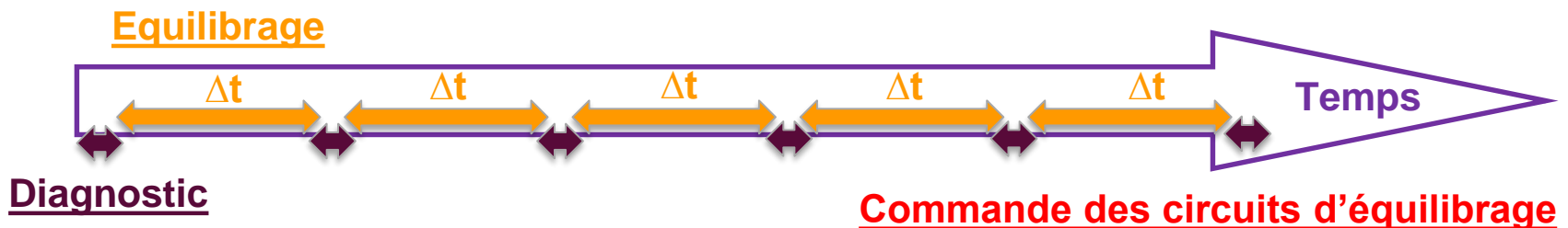
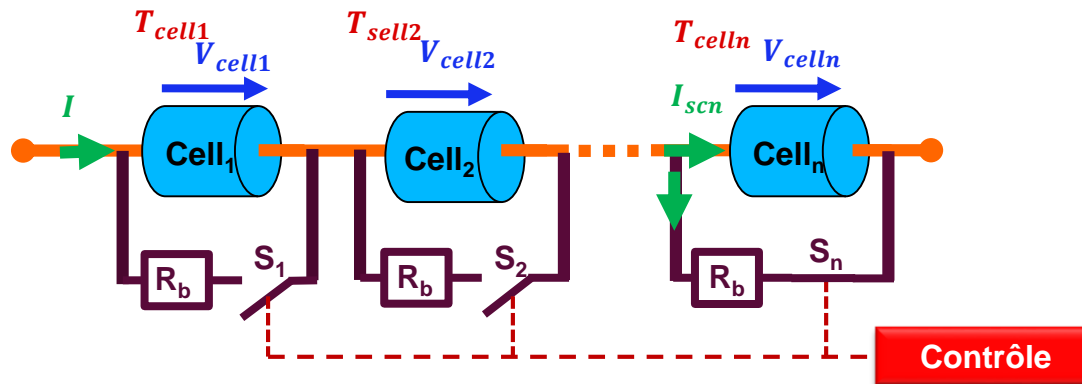
- ↪ On ne cherche plus à équilibrer les tensions
- ↪ On cherche à équilibrer les vitesses de dégradation
 - Estimer le niveau de dégradation de chaque cellule via le SOH donné par le BMS ou via le circuit d'équilibrage (cf. ci-dessous)
 - Adapter la commande des circuits d'équilibrage en vue de réduire les sollicitations des cellules les plus faibles



Vers un équilibrage des durées de vie des cellules

Si SOH estimé par circuit d'équilibrage, 2 étapes de commande des circuits d'équilibrage :

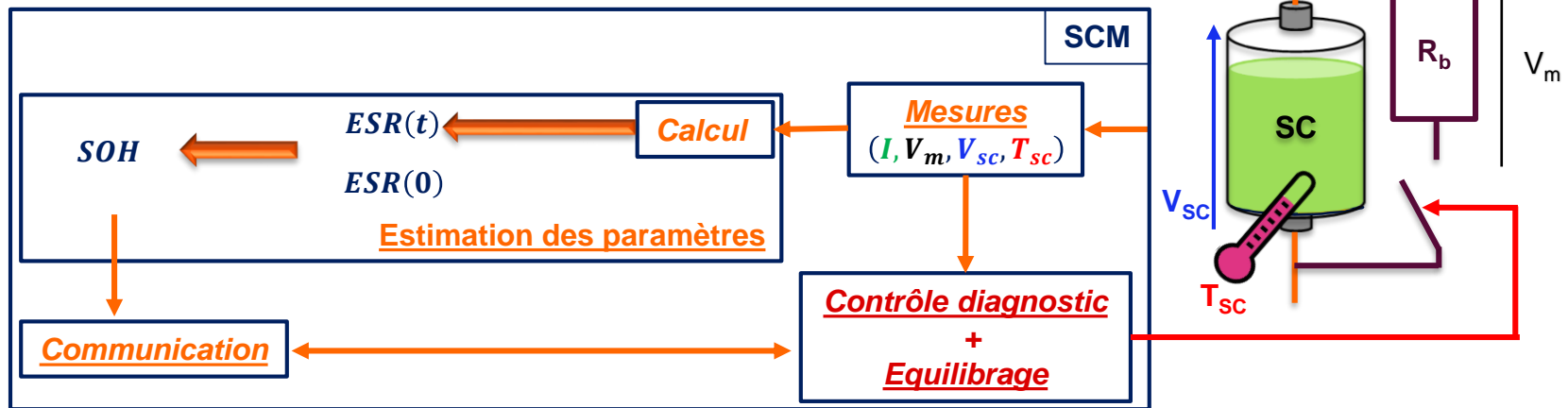
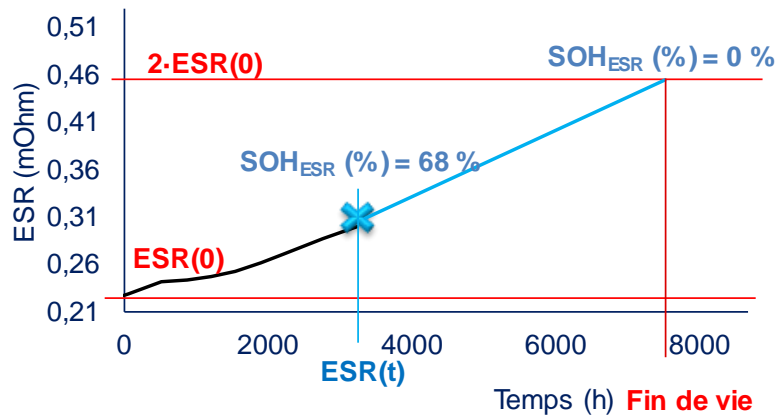
- Estimer la durée de vie des cellules (diagnostic) (commande occasionnelle)
- Améliorer la durée de vie des supercondensateurs (Equilibrage) (commande continue)



Estimation de la durée de vie des supercondensateurs via la circuit d'équilibrage



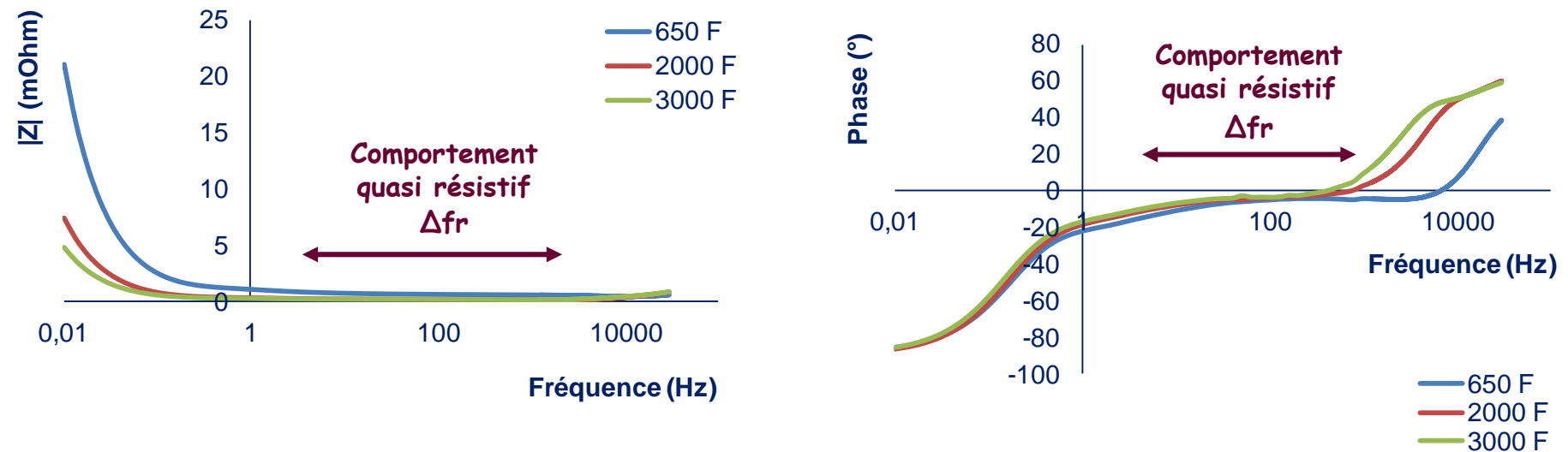
Critère de fin de vie considéré $ESR(t) = 2 \cdot ESR(0)$



Estimation de la durée de vie des supercondensateurs via la circuit d'équilibrage

Estimation de $ESR(t)$ grâce à la commutation autour de la fréquence de résonance Δfr du circuit d'équilibrage

Diagramme de Bode de différents SCs



Mesures de la tension et du courant dans la bande de fréquence Δfr

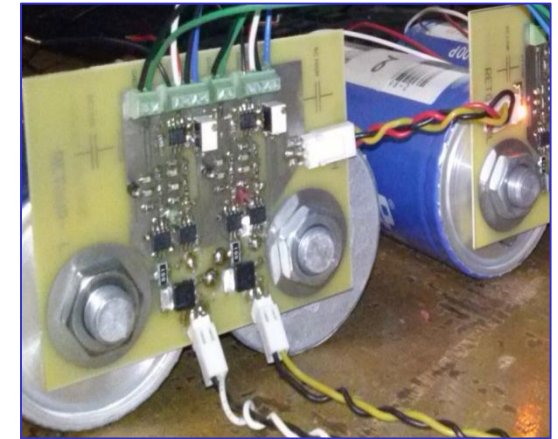
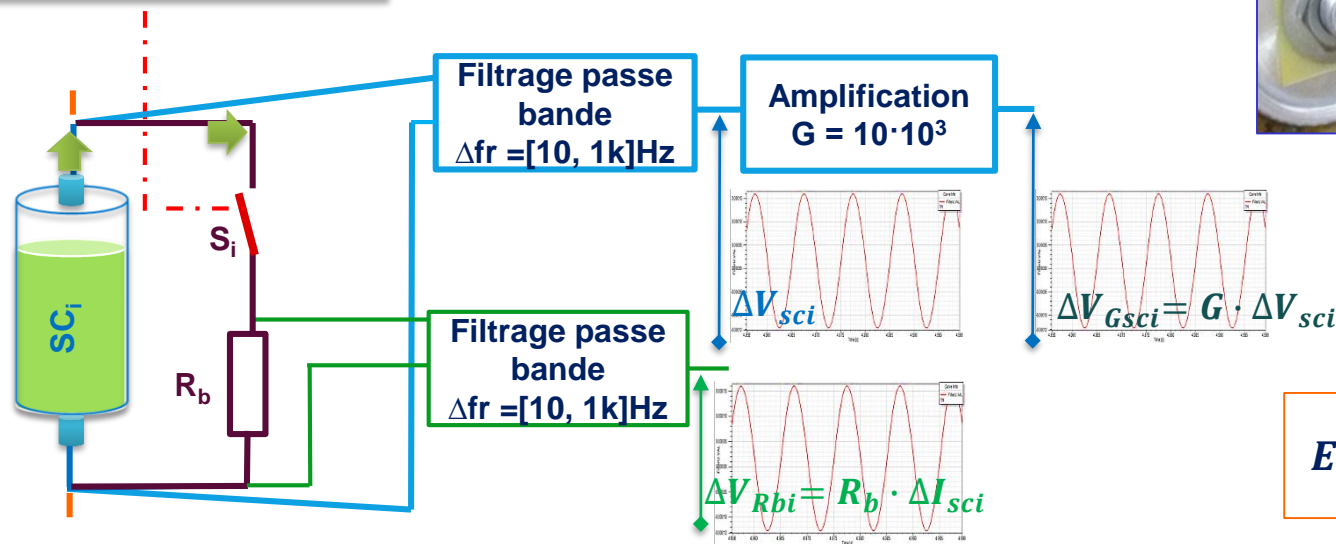
⇒ $Z(t)$ donc $ESR(t)$ puisque $Z(t) = ESR(t)$ pour les fréquences considérées

Estimation de la durée de vie des supercondensateurs via le circuit d'équilibrage

Estimation de ESR(t) grâce à la commutation autour de la fréquence de résonance Δf_r du circuit d'équilibrage

$SC_i, i \in [1, n]$ au repos

Commutation à $f_0 \pm \Delta f_r$

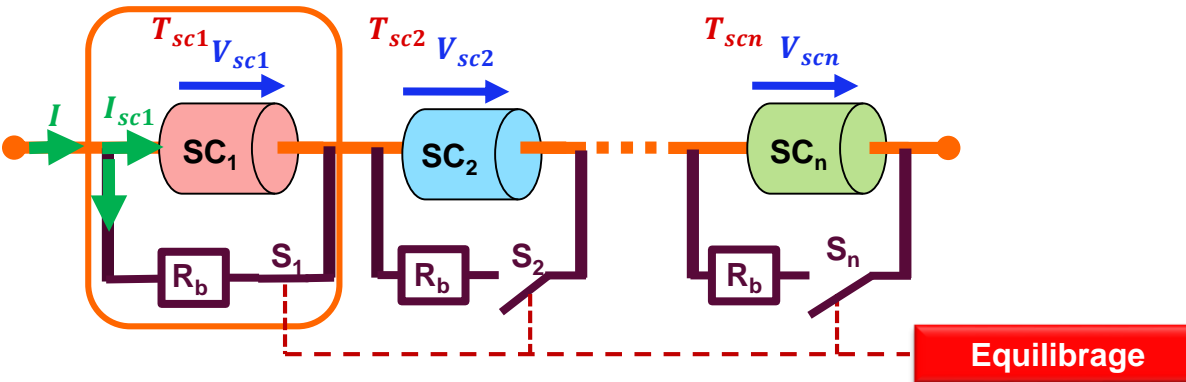


$$ESR_i = \frac{\Delta V_{Gsci} \cdot R_b}{G \cdot \Delta V_{Rbi}}$$

Contrôle des circuits d'équilibrage en vue d'améliorer la durée de vie des supercondensateurs



Proposition d'une approche de commande originale : adaptation de la tension du SC à sa vitesse de dégradation

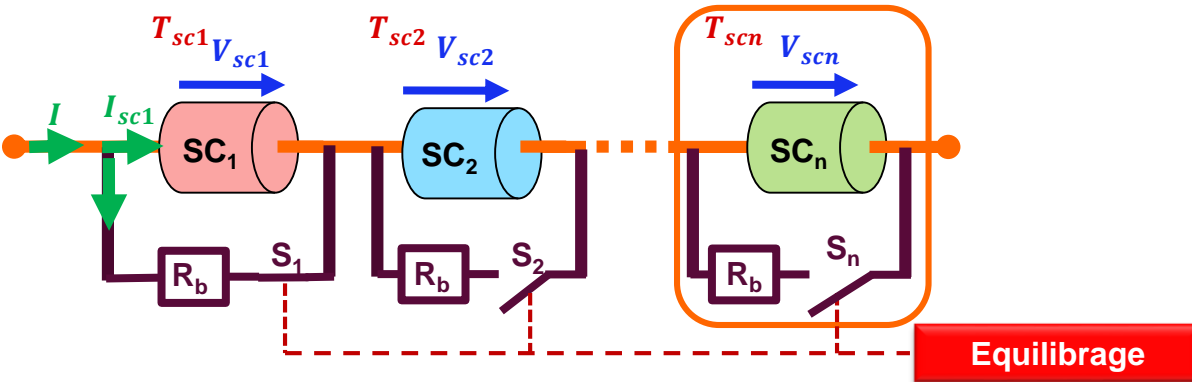


SCs les moins dégradés
Plus sollicités

Contrôle des circuits d'équilibrage en vue d'améliorer la durée de vie des supercondensateurs

Ampere

Proposition d'une approche de commande originale : adaptation de la tension du SC à sa vitesse de dégradation

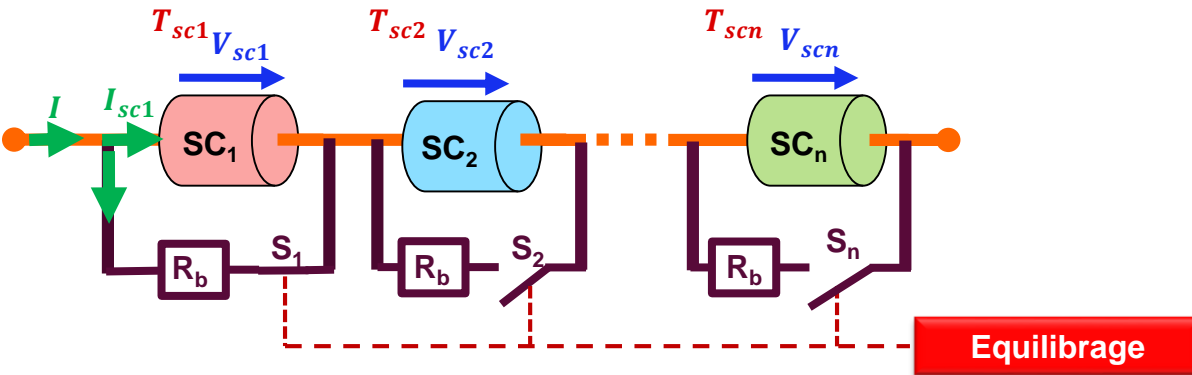


SCs les plus dégradés
Moins sollicités

Contrôle des circuits d'équilibrage en vue d'améliorer la durée de vie des supercondensateurs



Proposition d'une approche de commande originale : adaptation de la tension du SC à sa vitesse de dégradation



*Equilibrer les niveaux de dégradation
Maximiser la durée de vie du module*

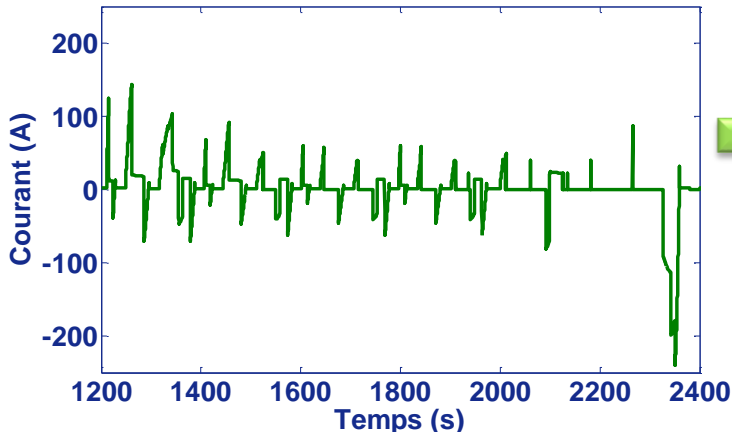
Contrôle des circuits d'équilibrage en vue d'améliorer la durée de vie des supercondensateurs



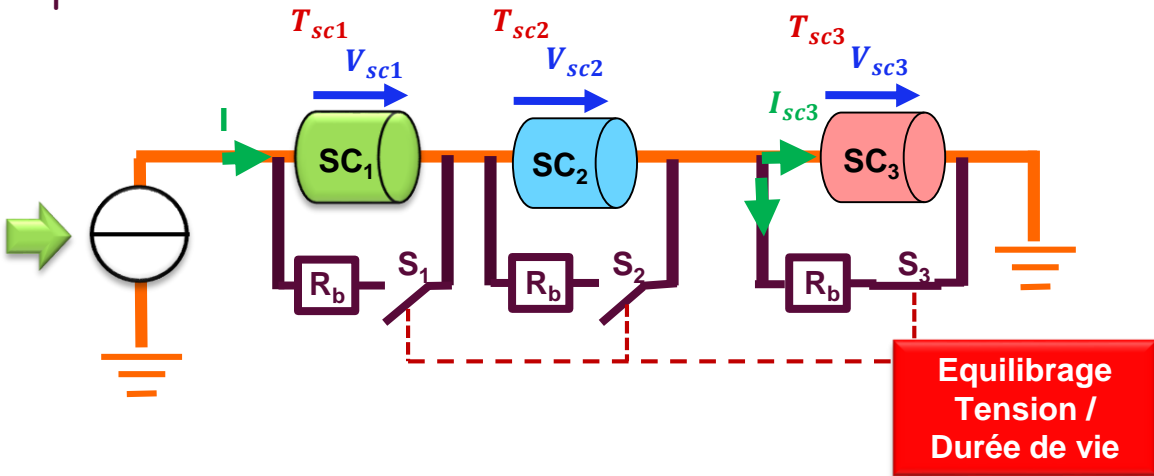
Etude d'un module de 3 SCs avec dispersion de températures

↳ Comparaison de l'impact de la commande sur l'évolution des SC avec :

- Un équilibrage classique en tension
- L'équilibrage en durée de vie proposé



Cycle NEDC en courant



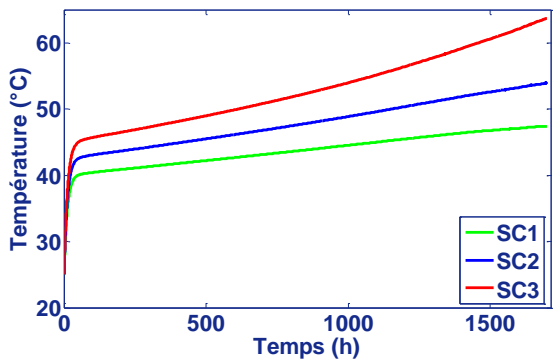
Durée de vie en considérant loi d'Eyring :

$$\tau(V_{sc}(t), T_{sc}(t), I_{eff}(t)) = \frac{(t_f - t_i)}{\frac{1}{\tau_0} \cdot \int_{t_i}^{t_f} e^{\left(\frac{V_{sc}(t)}{V_0} + \frac{T_{sc}(t)}{T_0} + \frac{I_{eff}(t)}{I_0}\right)} dt}$$

Contrôle des circuits d'équilibrage en vue d'améliorer la durée de vie des supercondensateurs

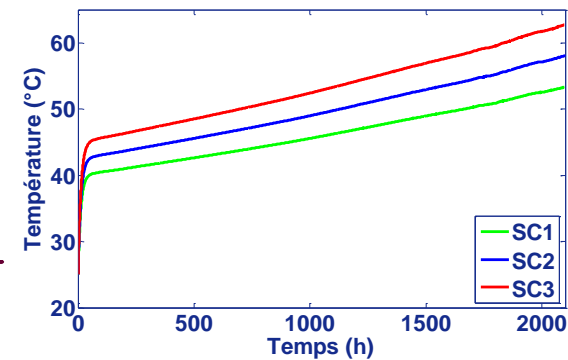


Exemple de résultat de commande des circuits d'équilibrage



	ESR _i (0) (mΩ)	C _i (0) (F)
SC ₁	0,232	3300
SC ₂	0,261	3000
SC ₃	0,290	2700

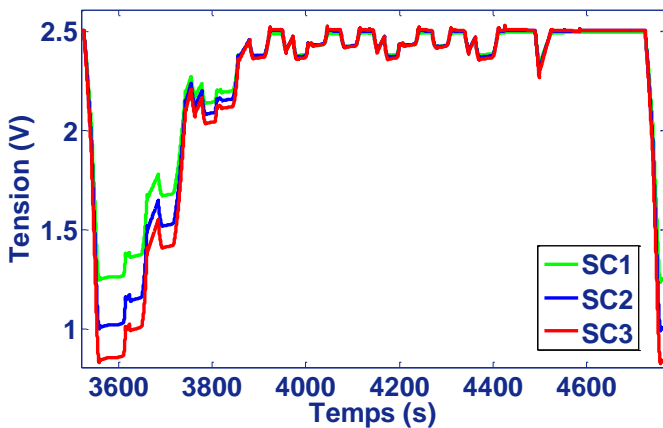
Evolution de la température des cellules au cours du vieillissement



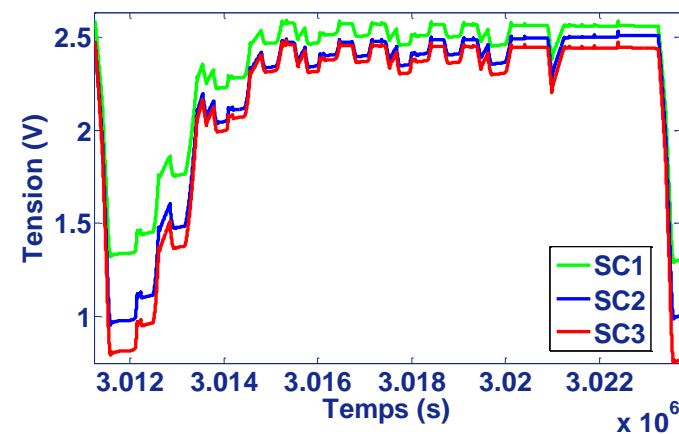
Equilibrage en tension

VS

Equilibrage en durée de vie



Tension des cellules pour quelques cycles



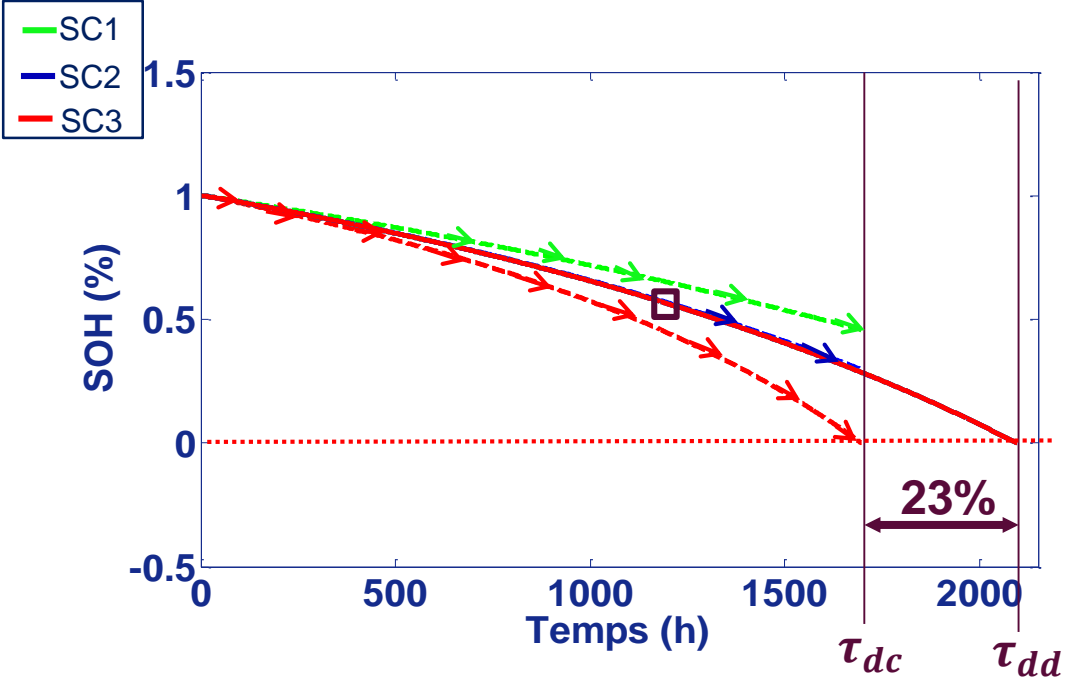
Contrôle des circuits d'équilibrage en vue d'améliorer la durée de vie des supercondensateurs



Exemple de résultat de commande des circuits d'équilibrage

VS Equilibrage en tension \rightarrow
 Equilibrage en durée de vie \rightarrow

	ESR _i (0) (mΩ)	C _i (0) (F)
SC ₁	0,232	3300
SC ₂	0,261	3000
SC ₃	0,290	2700



Avec mêmes contraintes, prolongation de ~ 20 % de la durée de vie avec la nouvelle approche de commande

Conclusion

- ↪ Applications différentes pour batterie lithium-ion (source d'énergie) et supercondensateurs (source de puissance)
- ↪ SSEE = composants avec période d'usure et donc à durée de vie limitée
- ↪ Durée de vie modélisable par loi analytique (Eyring, ...)
- ↪ BMS et équilibrage nécessaires pour gérer l'énergie d'un assemblage de plusieurs cellules
- ↪ Equilibrage innovant maximisant la durée de vie du SSEE

MERCI pour votre attention