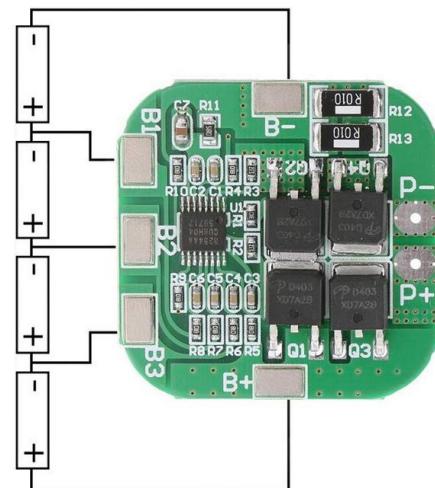


Eléments de protection et de surveillance des SEE





Risques pour les personnes

- Mécanique : pièces en mouvement
- Electrique : risque de choc électrique (fuite de courant)
- Chaleur : risque de brûlure
- Acoustique : risque pour l'audition

Risques pour les composants

- Mécanique : chocs, vibrations, rupture des matériaux
- Electrique : surintensité, surtension, sous-tension (batterie)
- Chaleur : vieillissement prématué, voire destruction



Fonctions de protection électrique

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Sectionneur

- Permet de séparer mécaniquement un circuit électrique et son alimentation
- Utilisé pour travailler sur un système électrique en toute sécurité
- Doit pouvoir être condamné (pose d'un verrou) en position ouverte

Interrupteur

- Permet d'interrompre et de rétablir le passage du courant dans un circuit électrique
- Celui-ci doit pouvoir supporter la création d'un arc électrique (circuit inductif)

Disjoncteur

- Permet d'interrompre le courant électrique en cas d'incident sur un circuit électrique
- Assure la protection d'une installation contre les surcharges, les courts-circuits



Fusible

- Doit couper le courant électrique lors d'une surcharge ou d'un court-circuit
- Le fusible est conçu pour fondre, il doit donc être changé après utilisation
 - Fonction comparable au disjoncteur, mais moins cher

Contacteur

- Permet d'établir ou interrompre le passage du courant, à partir d'une commande à distance (électrique ou pneumatique)

Différentiel

- Doit couper le courant électrique lors d'une différence de courant entre la/les phases et le neutre (fuite de courant)
- Il agit pour protéger les personnes
- Seuil classique : 30 mA (paralysie respiratoire)



Composants pour la protection électrique

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

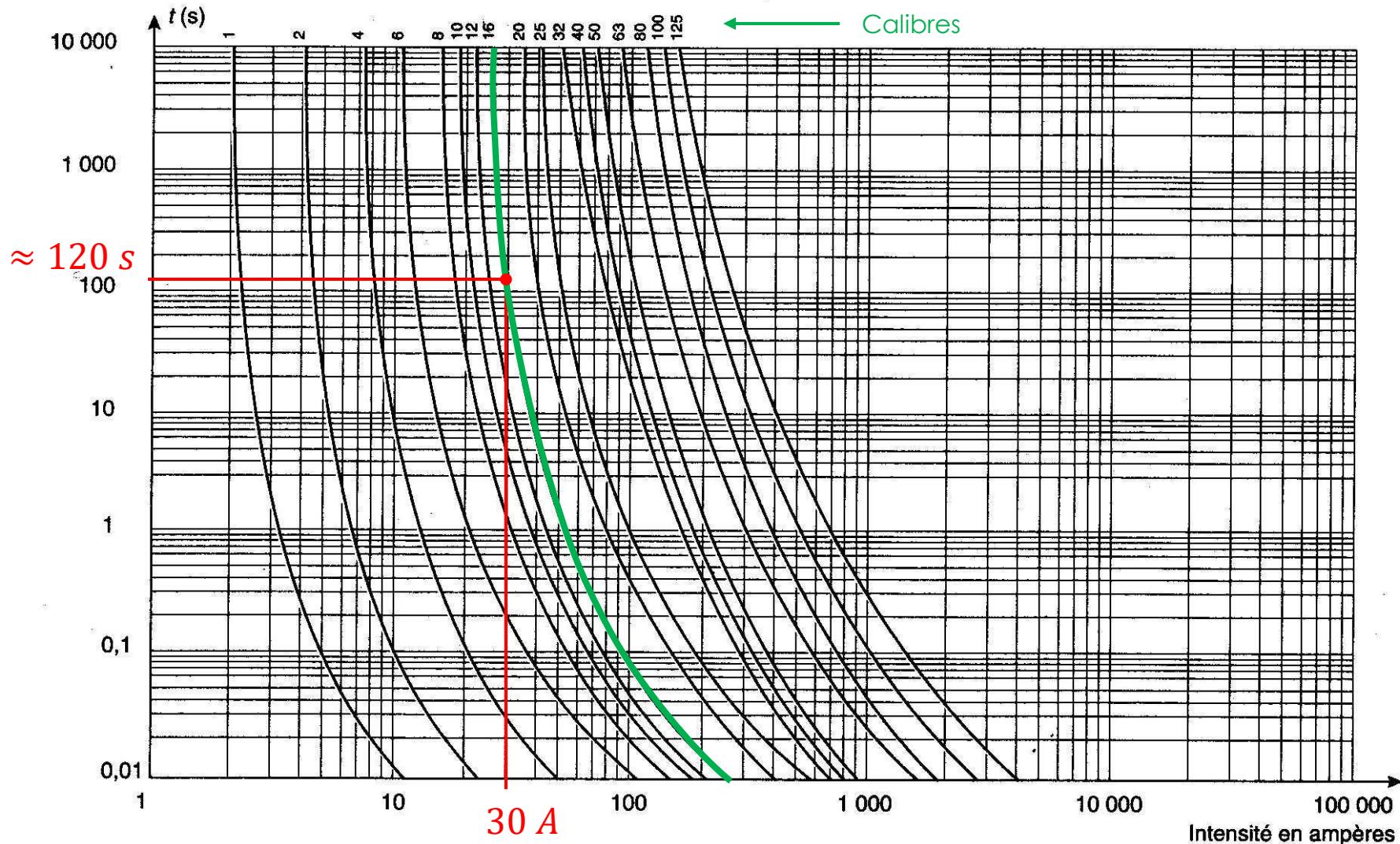
Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Fusible

- Le fusible est conçu pour fondre en un certain temps à un certain courant

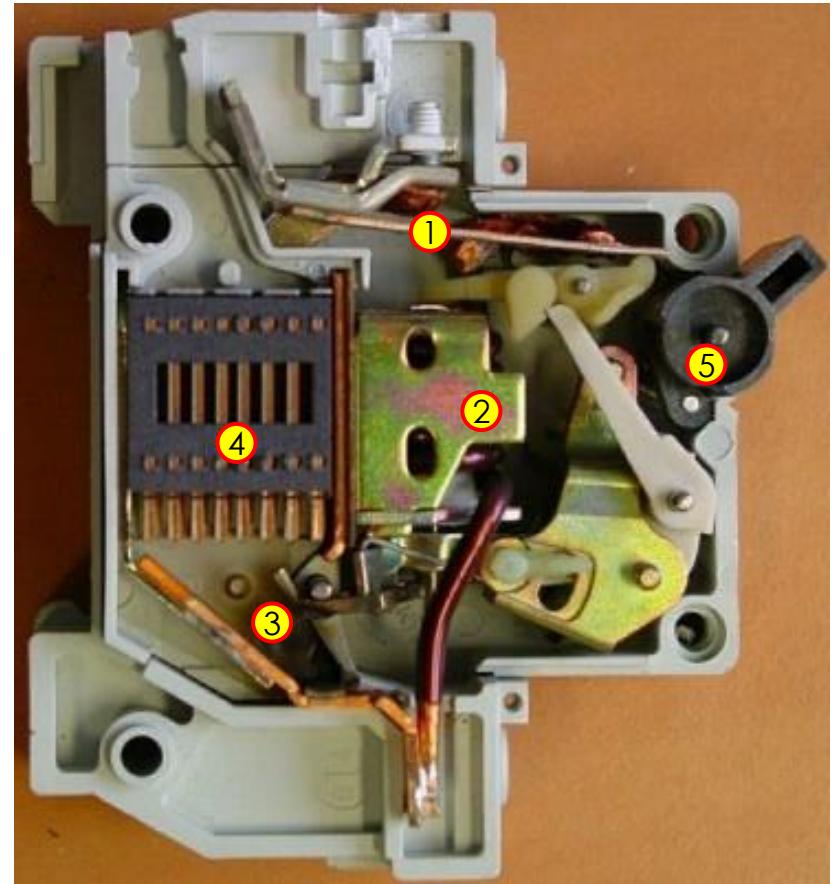
Courbes de fusion des cartouches type gG.





Disjoncteur

- Déclenchement magnétique (surintensité) : ouverture par un électroaimant
- Déclenchement thermique (surcharge) : ouverture par un bilame (surcharge)
- Constituants :
 1. Bilame
 2. Electroaimant
 3. Zones de contact électrique
 4. Chambre de coupure
 5. Interrupteur



Lien vers arc électrique

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Interrupteur

- Permet d'interrompre et de rétablir le passage du courant dans un circuit électrique
- Celui-ci doit pouvoir supporter la création d'un arc électrique (circuit inductif)



Sectionneur

- Permet de séparer mécaniquement un circuit électrique et son alimentation
- Utilisé pour travailler sur un système électrique en toute sécurité
- Doit pouvoir être condamné (pose d'un verrou) en position ouverte



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

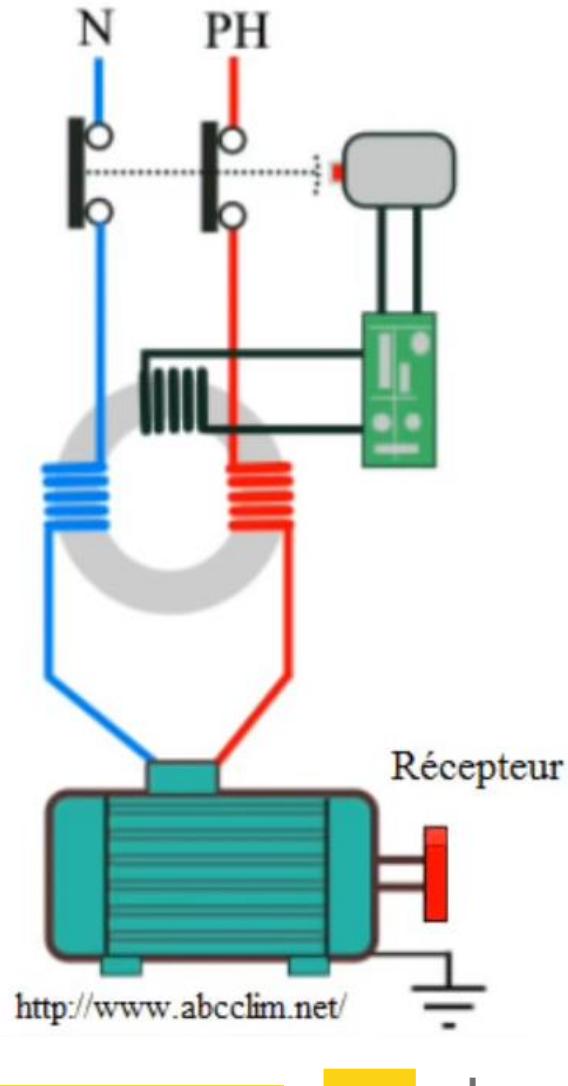
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr





Différentiel

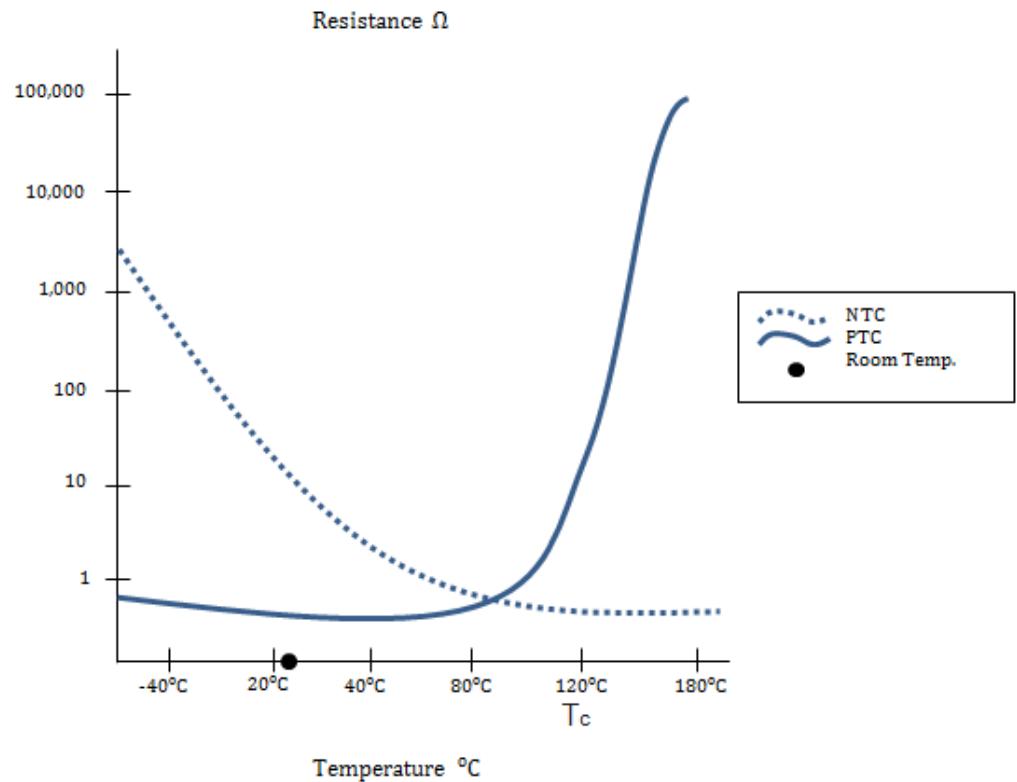
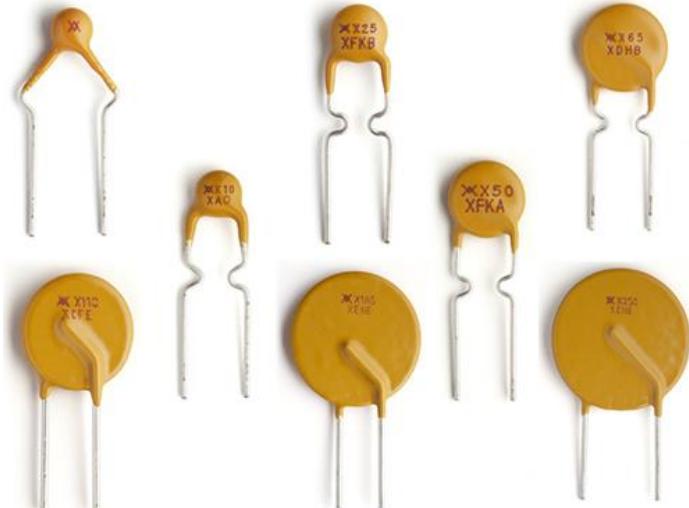
- Doit couper le courant électrique lors d'une différence de courant entre la/les phases et le neutre (fuite de courant)
- Fonctionne avec un circuit magnétique
- En cas de déséquilibre, un flux magnétique est créé dans le tore, ce qui génère une tension dans le bobinage noir
- Dès que cette tension est détectée, le circuit est ouvert





« Fusible PTC »

- PTC : *positive thermal coefficient* (CTP en français)
 - Matériau dont la résistance augmente lorsque sa température augmente
- Composant électronique passif utilisé pour protéger contre les défauts de surintensité dans les circuits électriques.



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

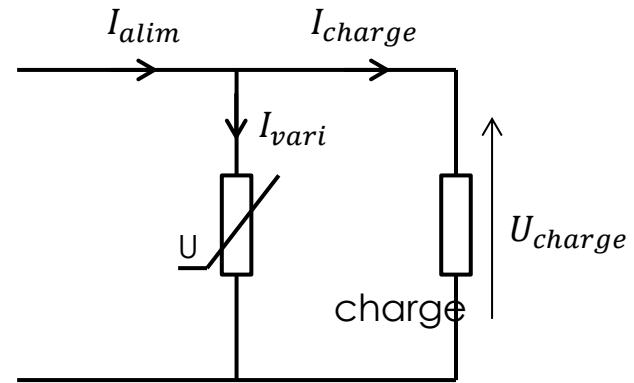
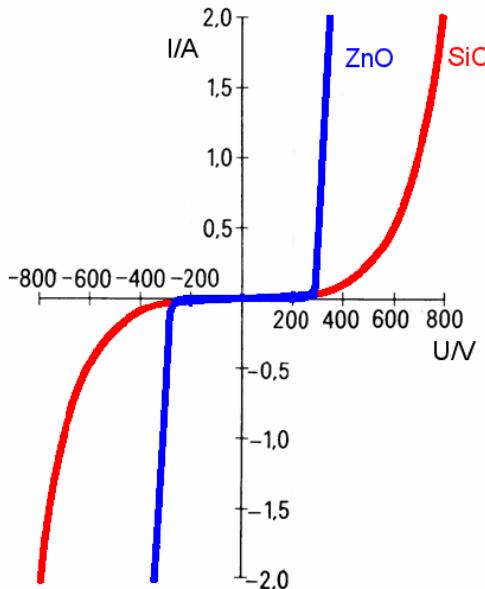
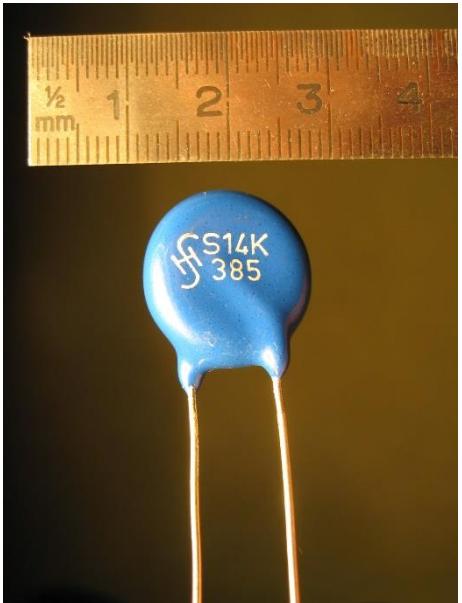
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Varistance

- Résistance électrique dont la valeur varie en fonction de la tension à ses bornes (*significativement conductrice à partir d'une certaine tension*)
- Matériau : oxydes métalliques (MOV pour *metal oxyde varistor*)
- Peut protéger contre des surtensions de courte durée



- Si $U_{charge} > U_{seuil}$
- Alors $I_{vari} > 0$
- Surplus de puissance absorbé par la varistance
- U_{charge} n'augmente presque plus



Parafoudre

- Varistance permettant d'absorber des puissances élevées
- Protection contre les surtensions (souvent la foudre)
- Permet de protéger des installations électriques



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Utilisation des éléments de protection dans les SEE

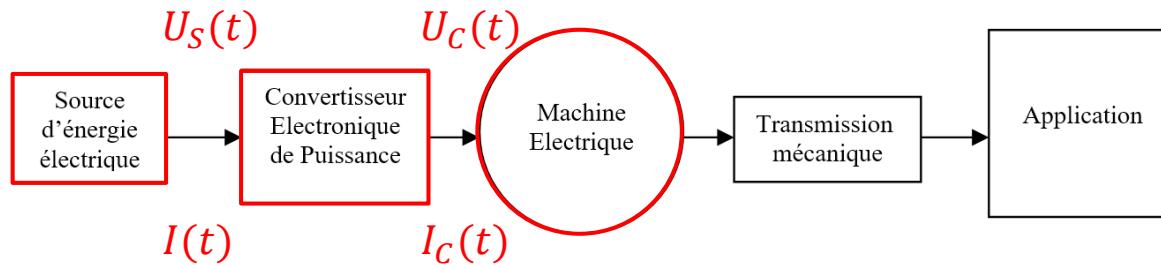
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



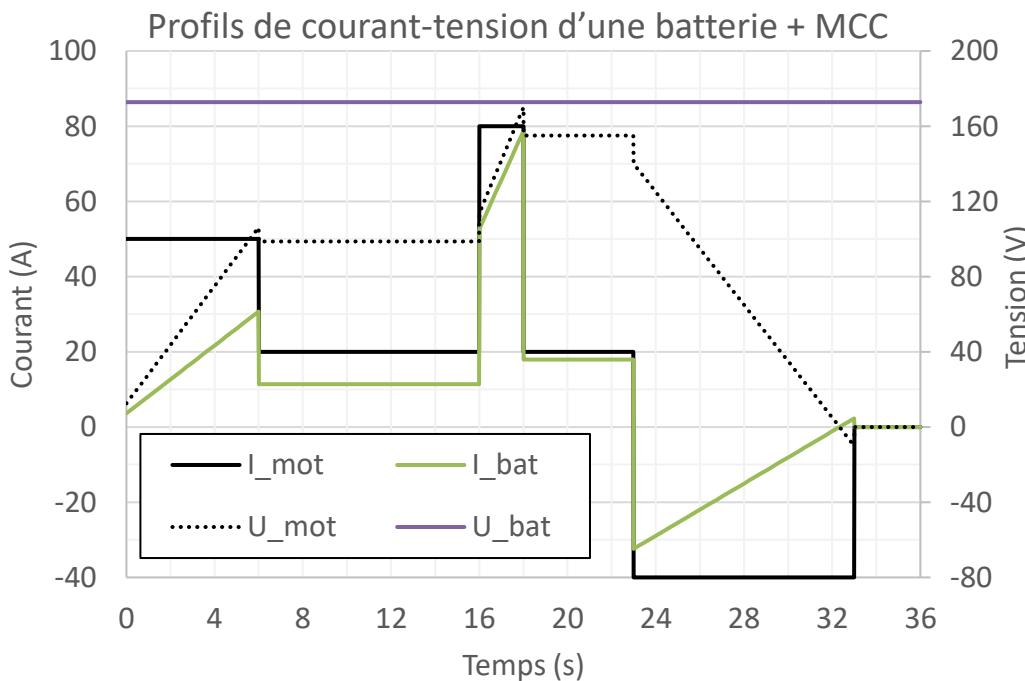
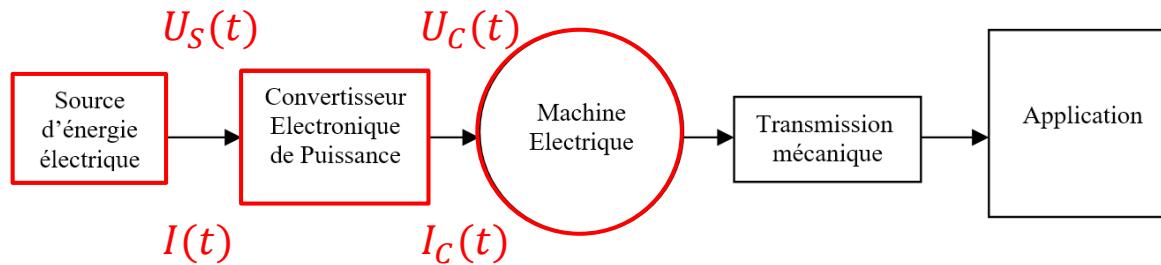
Utilisation des éléments de protection dans les SEE



- Détermination des valeurs de courant et tension maximales
- Protections à dimensionner en fonction de la résistance des composants et de leurs comportements



Utilisation des éléments de protection dans les SEE

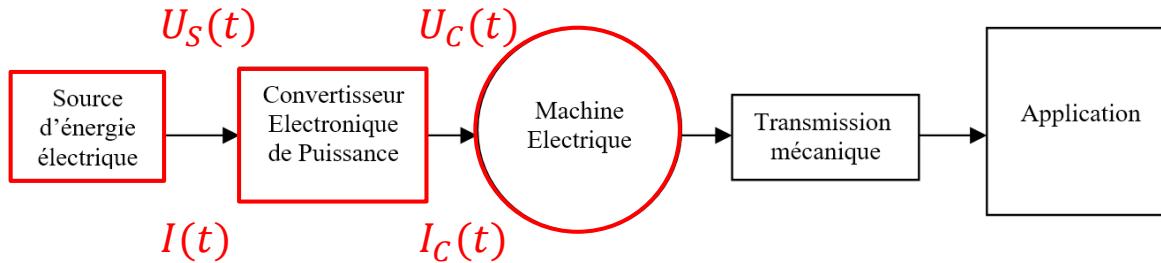


Détermination de :

- Courant moteur max
- Tension moteur max
- Courant batterie max



Utilisation des éléments de protection dans les SEE

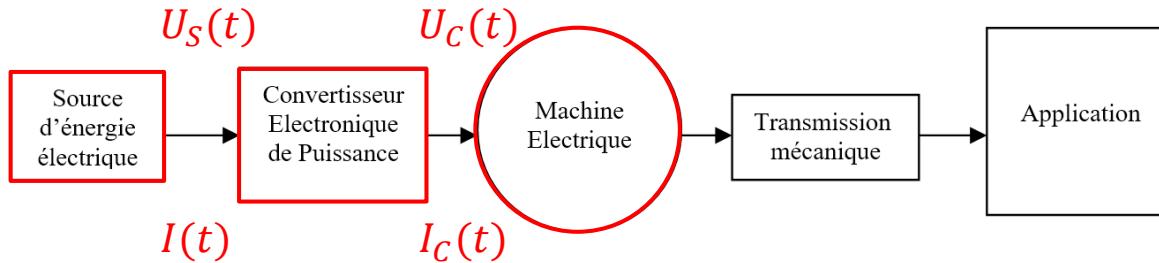


Exemple : machine avec rotor bloqué

- Si le rotor de la machine est bloqué et que la machine est sous tension :
 - Apparition d'un courant important pendant un temps significatif
 - Risque : surchauffe des bobinages ou du CEP (= surcharge)
 - Protection contre les surcharges : PTC / disjoncteur thermique
- Remarque : il ne faut pas que le système de protection se déclenche durant un régime transitoire du moteur, à moins que celui-ci ne dure trop longtemps.
 - C'est l'intérêt des protections thermiques, qui mettent un certain temps à se déclencher lors d'une surcharge



Utilisation des éléments de protection dans les SEE



Exemple : protection de la batterie

- La tension d'une batterie varie peu, mais aucune cellule ne doit dépasser sa tension maximale ou minimale
 - Risque : déclenchement de réactions néfastes (dégradations irréversibles)
 - Protection : surveillance électronique (mesure de tension)
 - Action : alerte, voire ouverture du relais principal de la batterie
- Protection contre les surintensités
 - Risque : échauffement important, dégradations irréversibles de la batterie
 - Protection : surveillance électronique + fusible général



Sécurité des batteries

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE

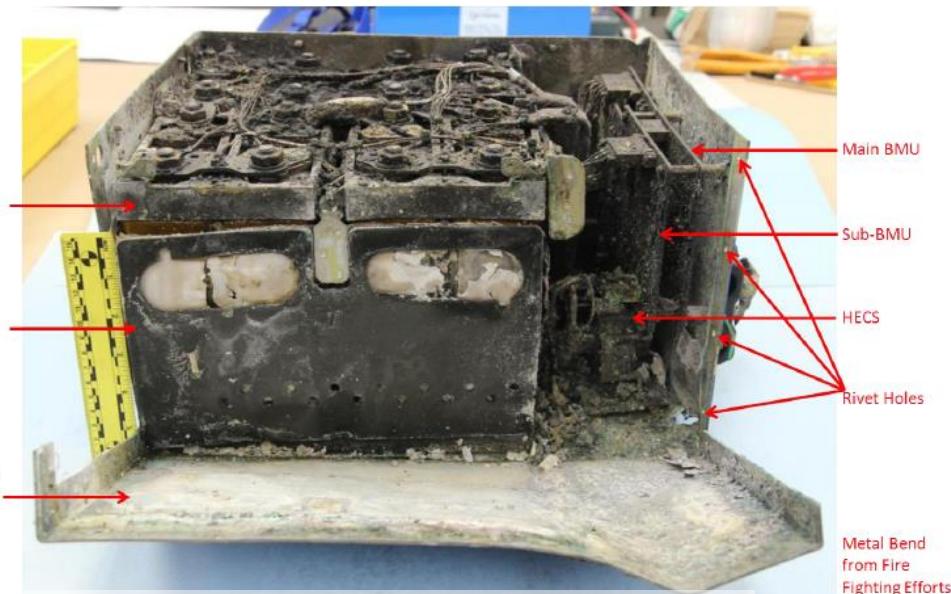


Incident du Dreamliner (Boeing 787)

- Après avoir été rechargée, la batterie de démarrage de l'APU a pris feu.
- La chimie choisie (LCO/graphite) est intéressante pour sa densité d'énergie, mais sujette à l'emballement thermique.



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM



Batterie démarrage APU Janvier 2013
Boeing 787 Dreamliner de Japan Airlines



Incident du Dreamliner (Boeing 787)

- Décision : enfermer la batterie dans un « sarcophage » résistant au feu + prévoir une évacuation des gaz en cas d'incident
- L'ajout d'un sarcophage compense les faiblesses de cette chimie, tout en supprimant son intérêt.



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Causes de dégradations des batteries Li-ion

- Causes internes
 - Contamination par des particules métalliques => court-circuit
 - Croissance de dendrites lors de charges rapides ou à froid => court-circuit
- Causes externes
 - Surcharge : création de dihydrogène => risque de flamme/explosion
 - Perforation : création d'un court-circuit interne => risque de flamme/explosion
 - Echauffement externe ($>90^{\circ}\text{C}$) : réactions exothermiques => emballement thermique

Mais les incidents restent relativement rares

- Forte médiatisation (Dreamliner, smartphones, PC portables...)
- Incidents pouvant être spectaculaires
- Produit relativement nouveau : peur par manque de recul



Exemple de défaillance grave d'un pack batterie

- <https://youtu.be/JECJAgRsp-4>



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

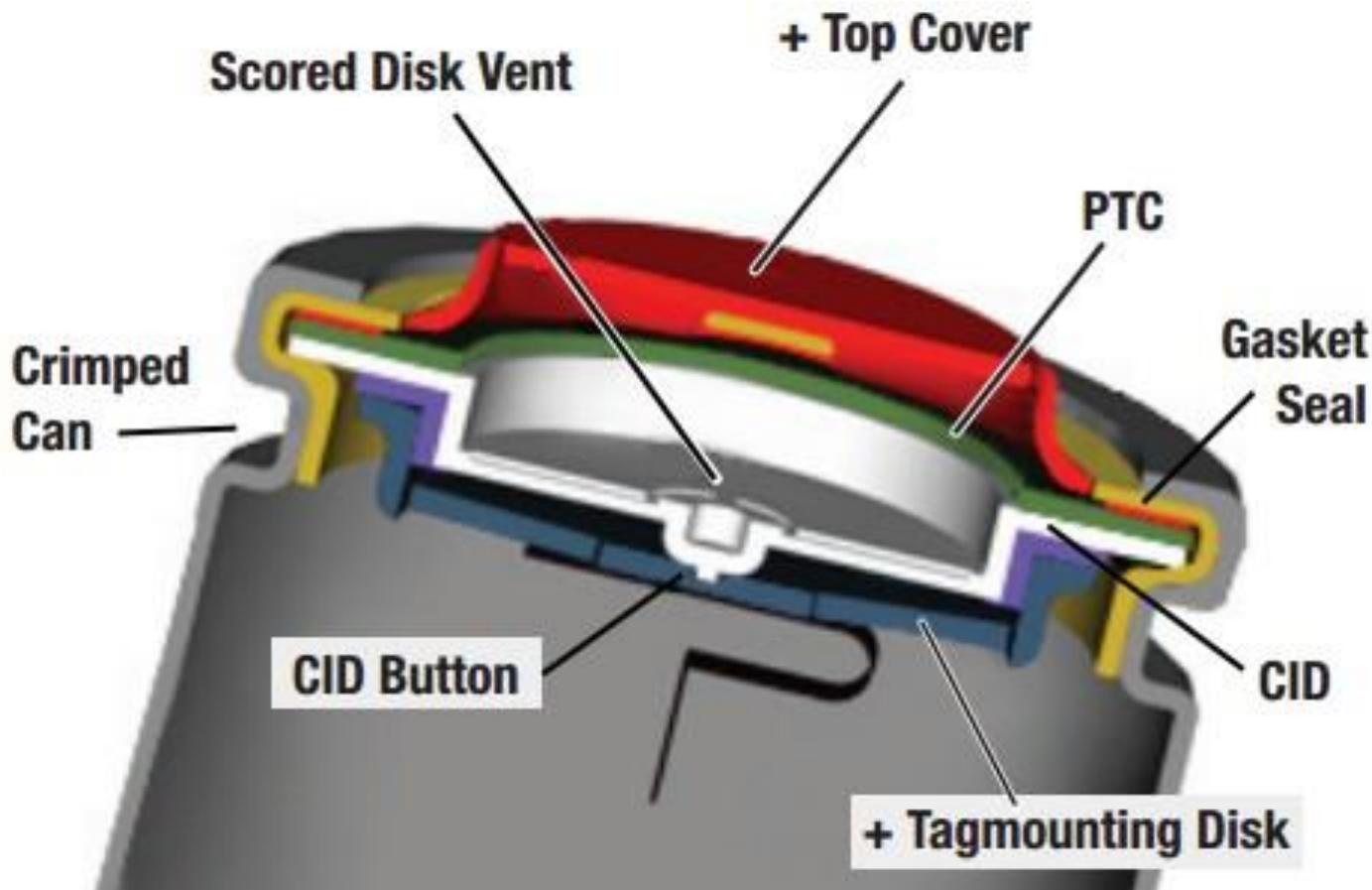
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Protections intégrées à une cellule cylindrique 18650

- CID (Current Interrupt Device) : déconnecte le pôle + en cas de surpression



Nicolas DAMAY
Maître de conférence
Département IN

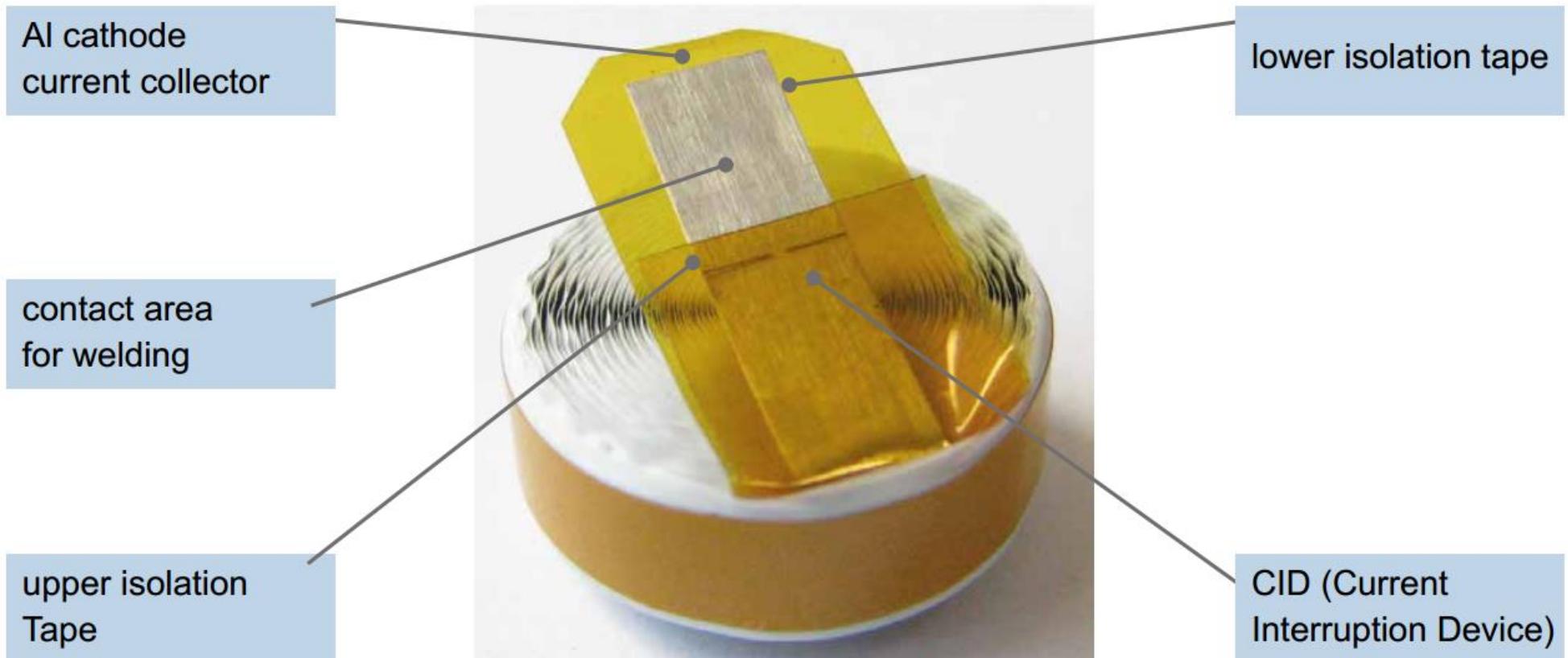
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Protection intégrée à une cellule type « pile bouton »

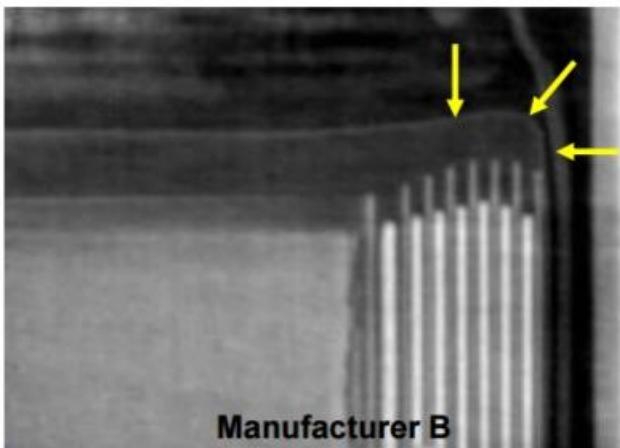
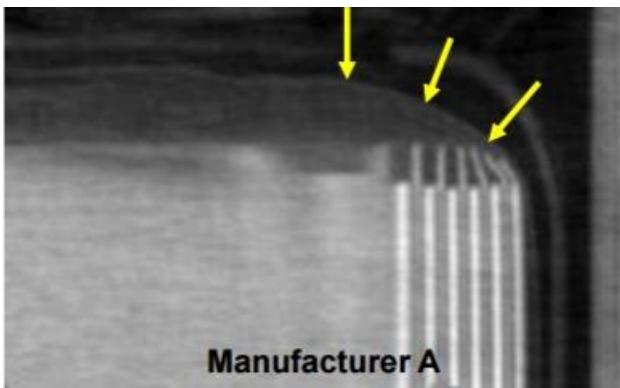
- En cas de surpression : rupture de la languette





Court-circuit interne

- Mauvais assemblage mécanique



Positive Tab



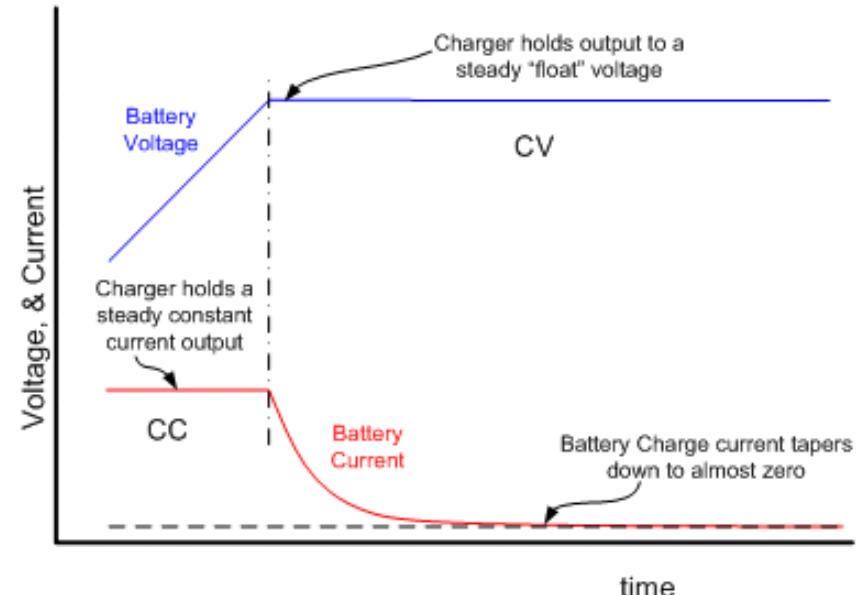
Negative Electrode
Opposite Positive Tab





Exemple de défaillance : cellule LiFePO₄/graphite (UTC)

- La cellule a été surchargée (dépassement de sa tension maximale : 3,7 V)
- /!\ Respect absolu du protocole de charge CCCV /!\\



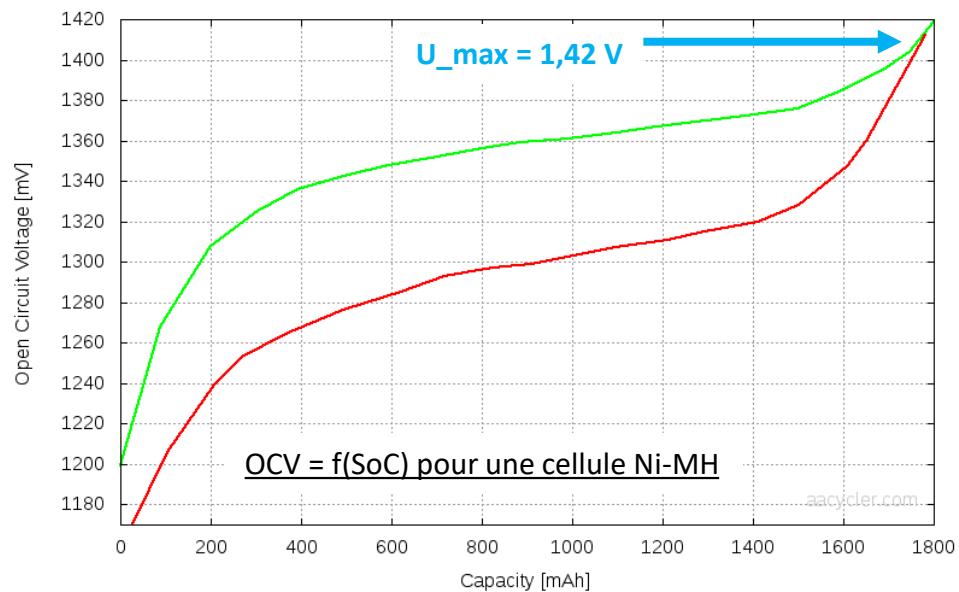
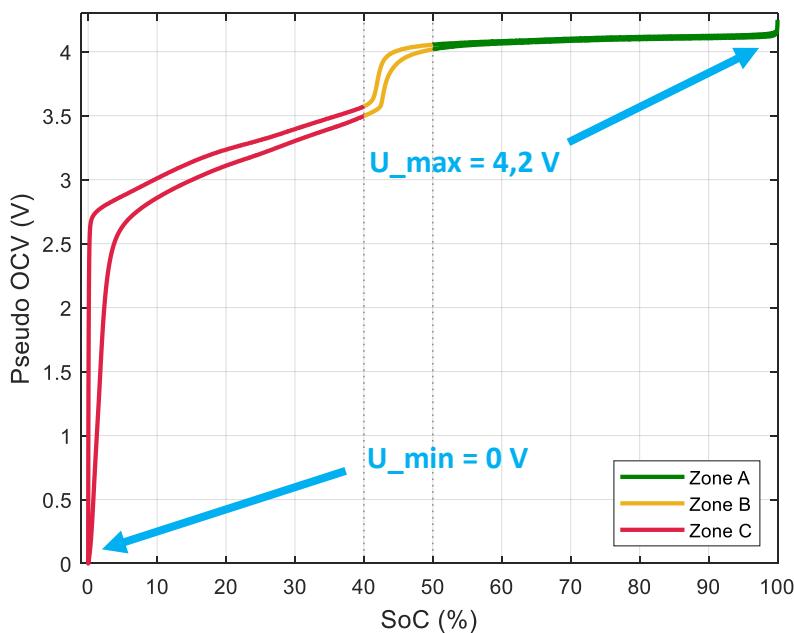
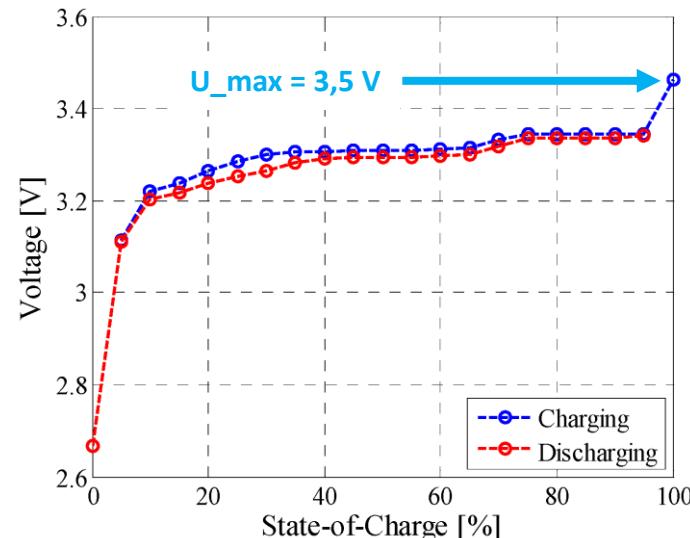
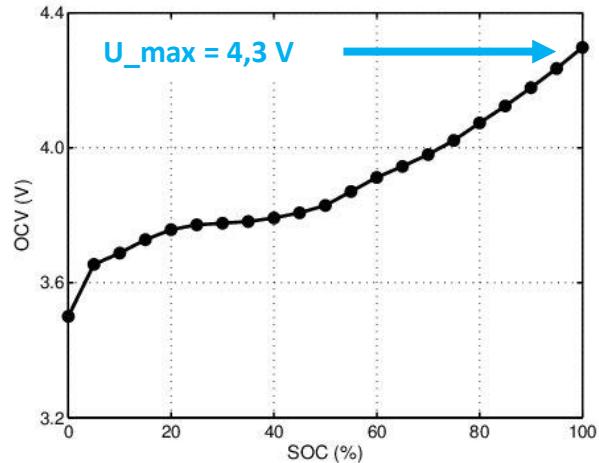
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



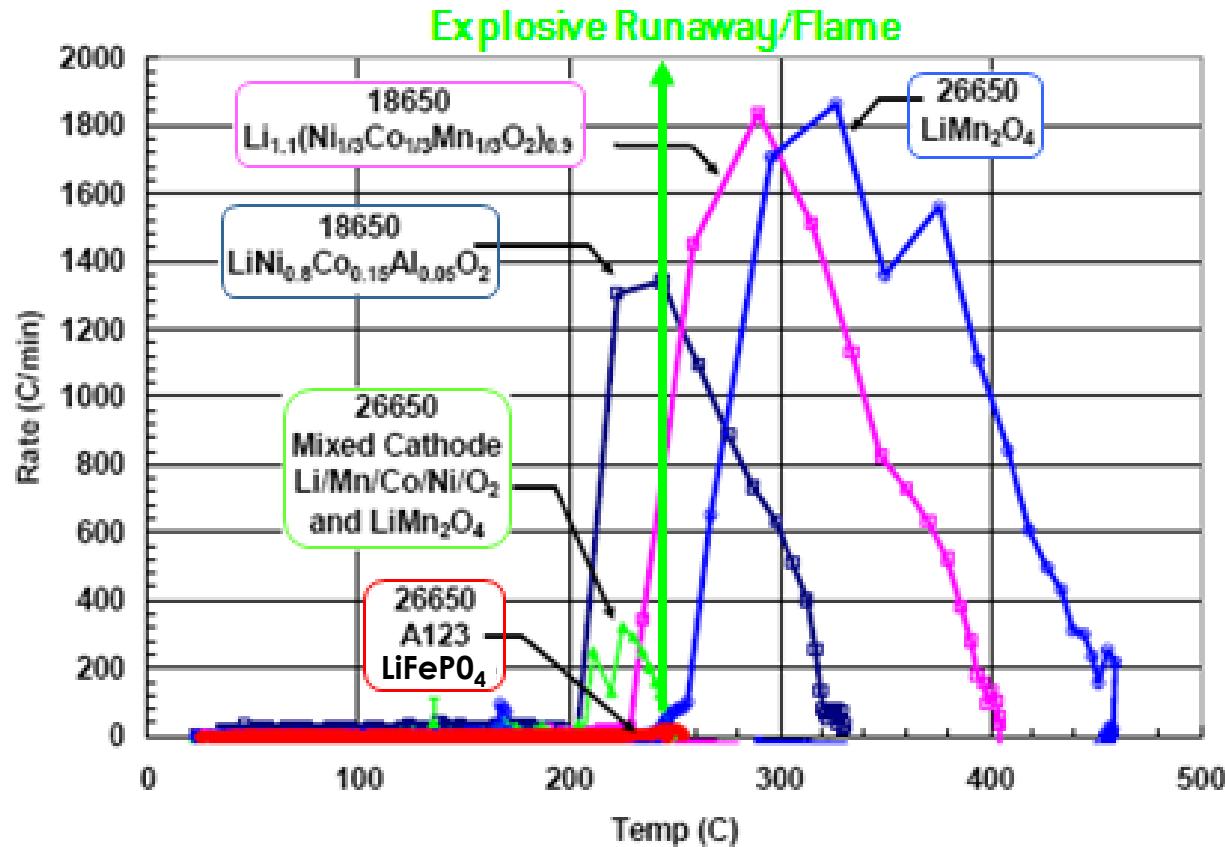
Δ chaque chimie son OCV en fonction du SoC (/!\ chargeur)





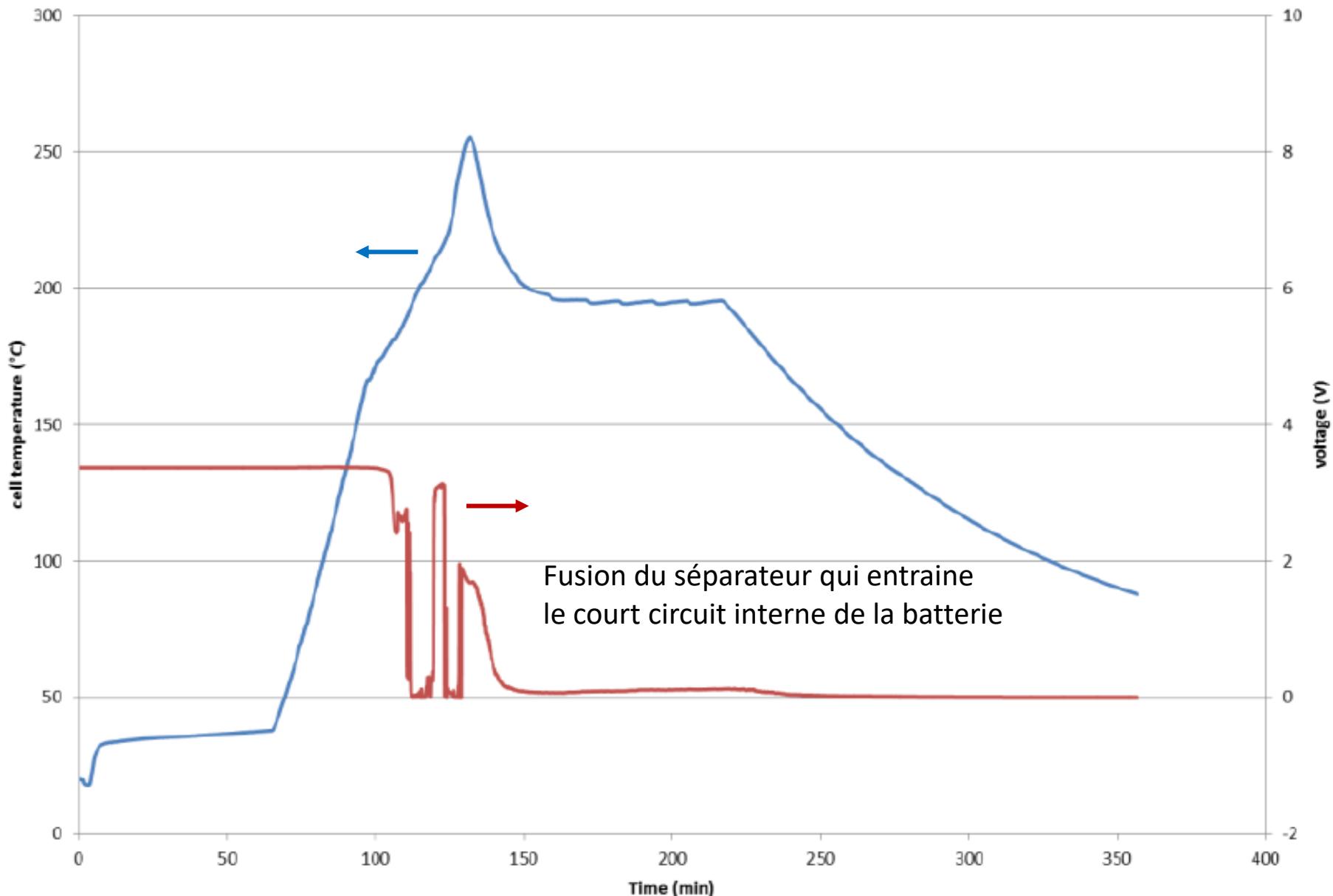
Exemple de défaillance : emballement thermique

- Essai : échauffement progressif de la batterie en calorimètre
- Mesure de dT/dt (en °C/min)
- Selon la chimie : déclenchement +/- tardif et +/- fort



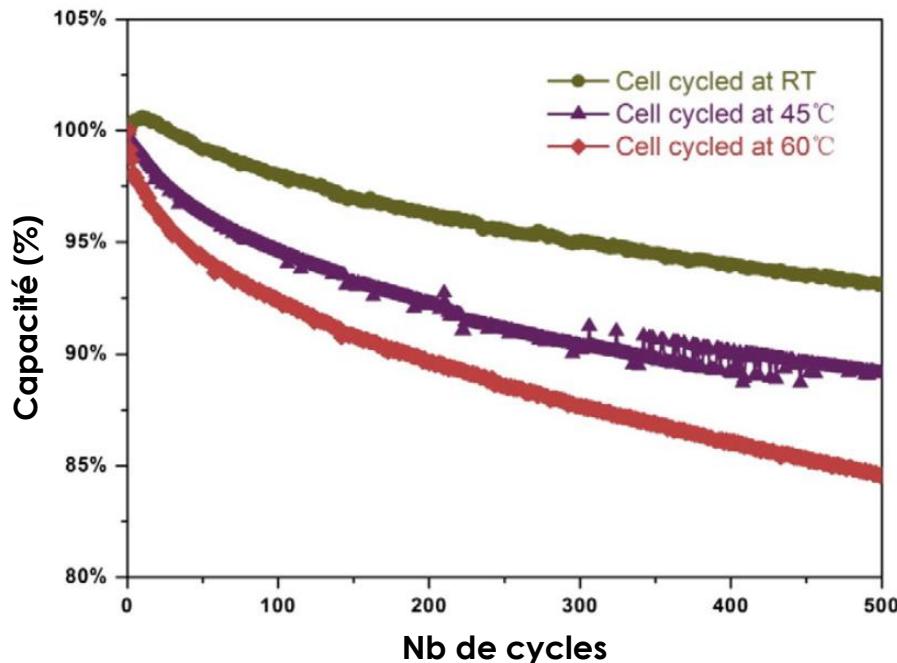


Signature électrique lors de l'emballement thermique

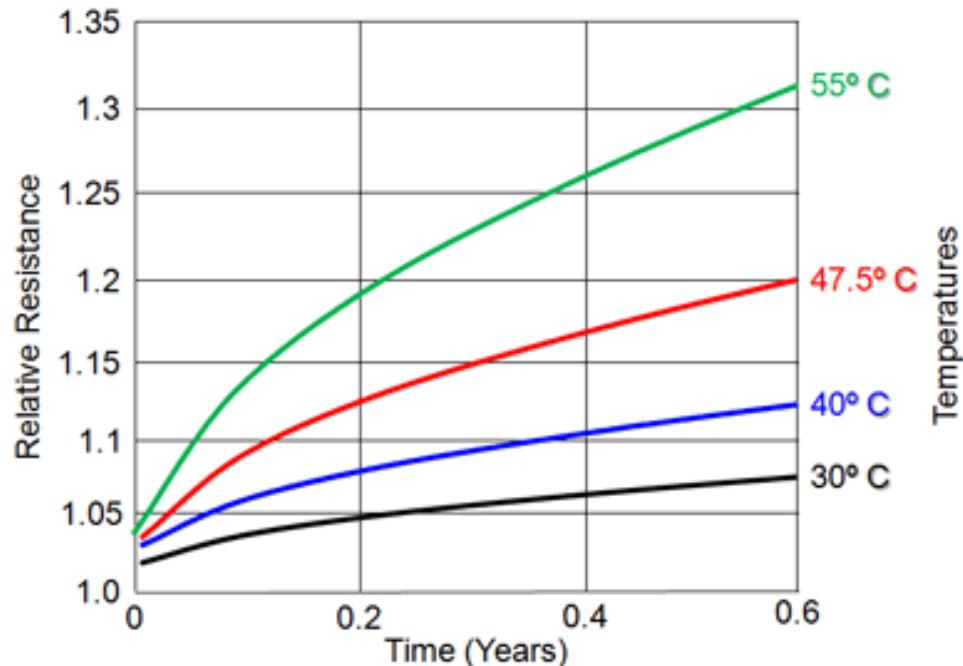




Dégénération lors d'un vieillissement « normal »



Réduction de capacité



Augmentation de résistance interne

- Deux conséquences principales : **perte d'énergie et perte de puissance**
- Phénomène **favorisé à haute température et à haut état de charge**



Bilan des causes de défaillance ou de dégradation

- Mauvaise conception de la cellule
- Causes mécaniques (perforation)
- Surcharge : état de charge > 100% (dépassement de la tension limite)
- Surintensité => dégradations internes
- Echauffement trop important (source externe ou auto-échauffement)

Utilisation indispensable d'un BMS !

- BMS : *Battery management system* (système de gestion de la batterie)
- Surveille les grandeurs critiques du pack batterie
- Peut transmettre des alertes à l'ordinateur de bord ou à l'utilisateur
- Peut déclencher l'ouverture du relais principal du pack batterie



Battery management system (BMS)

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

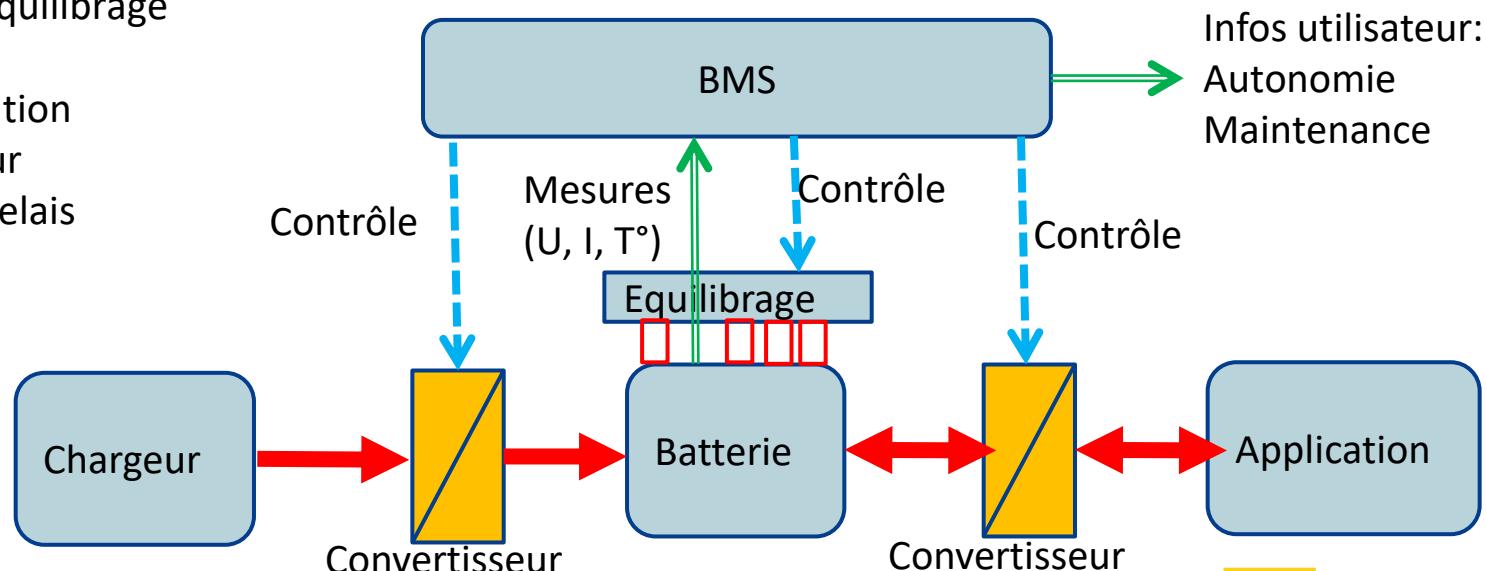
Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Rôle du BMS (Battery Management System)

Electronique de Surveillance / Monitoring / Contrôle qui assure du bon usage de la batterie

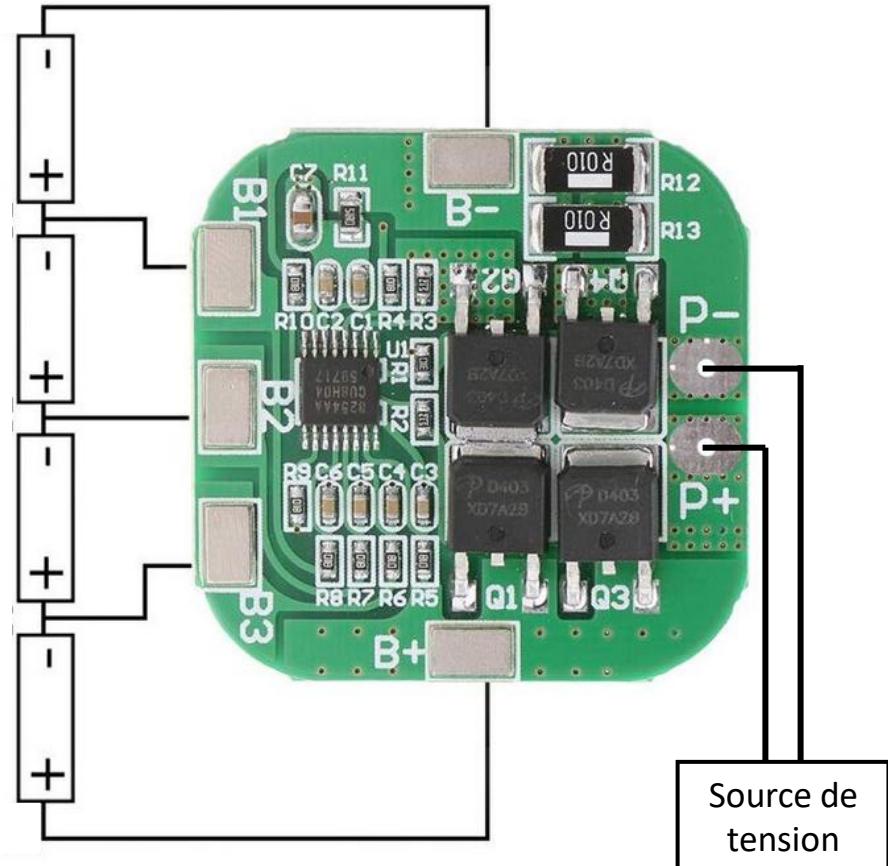
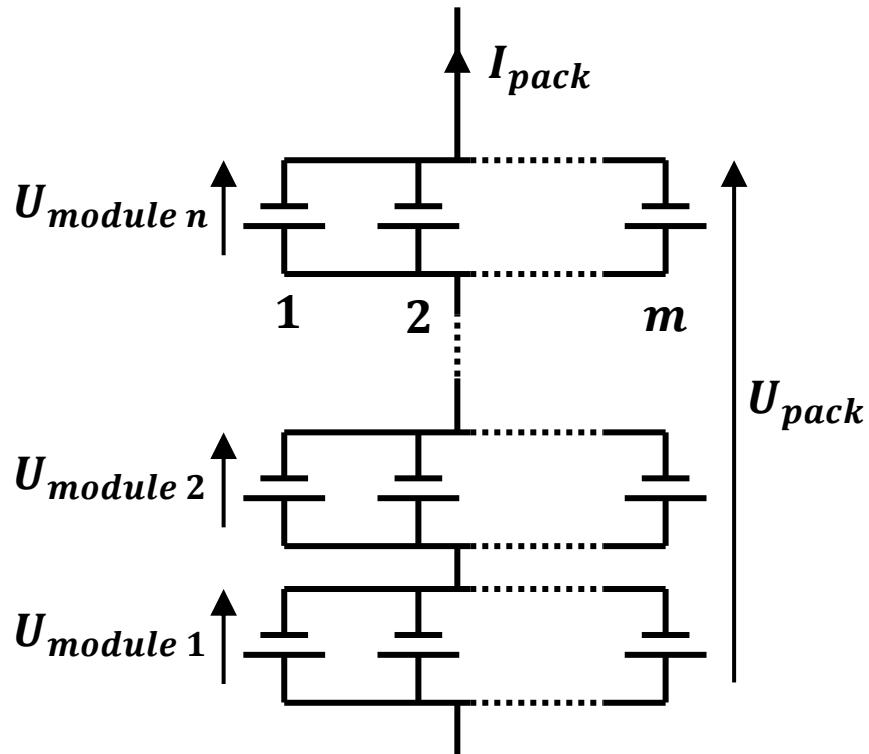
- **Surveillance** en tension
 - $U_{min} < \text{Tension batterie} < U_{max}$
 - Respect des protocoles de charge
- **Surveillance** en température
- **Surveillance** de l'état de charge
- **Contrôle** des convertisseurs pour autoriser ou limiter la puissance absorbée ou débitée
- **Contrôle** du système d'équilibrage
- **Monitoring** : communication d'informations à l'utilisateur
- **Sécurité** : ouverture du relais principal en cas d'urgence





Mesures de tensions

- Cellules en parallèle = 1 tension
- Indispensable : mesure des tensions de chaque module

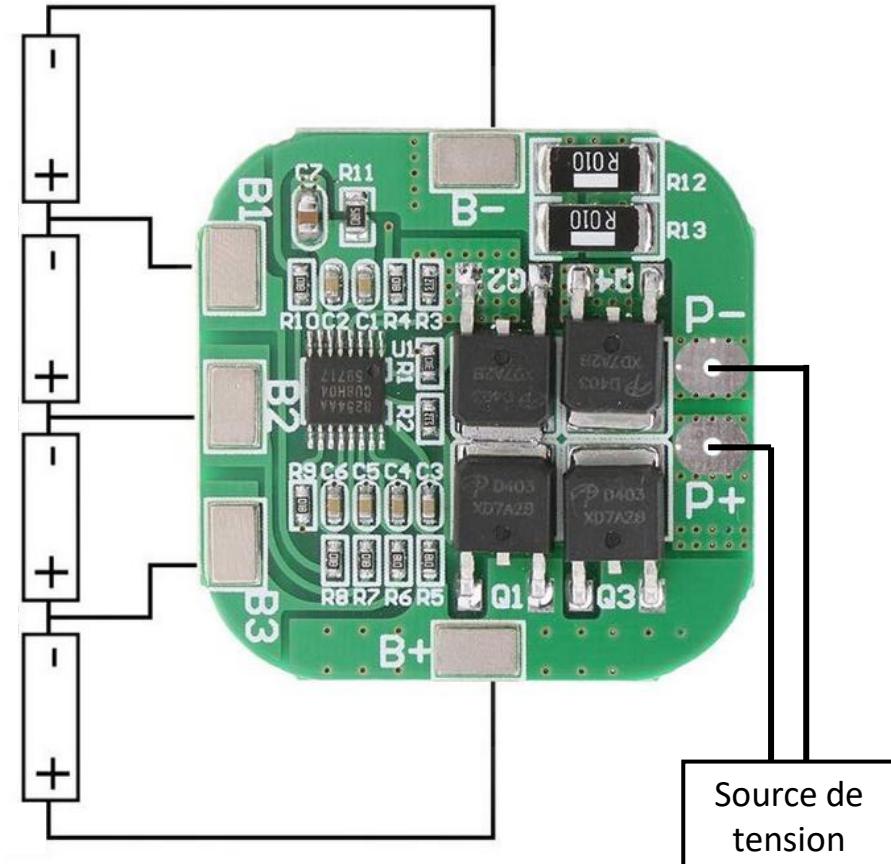


Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM



BMS pour la charge et la décharge

- En charge
 - Utilisation de la puissance amenée par la source
 - Régulation du courant de charge
 - Surveillance des tensions cellules
 - Si une cellule atteint sa tension max : limitation en tension
 - Permet une recharge CCCV de chaque élément
- En décharge (possible sur ce module ?)
 - Surveillance des tensions cellules
 - Ouverture d'un relais si une cellule atteint sa tension min
- Ici : pas de mesure de température prévue





Mesures de températures

- Objectif : connaître la température des cellules
 - < 0°C : limitation de la charge (dégradations, voire création de dendrites avec risque de court-circuit interne)
 - > 40~50 °C : demande de réduction du courant (refroidissement nécessaire)
- Objectif : repérer un risque d'emballement thermique
 - > 55~60°C : arrêt absolu

- Mesures sur chaque cellule = coûteux
- Réduction des coûts : capteurs répartis

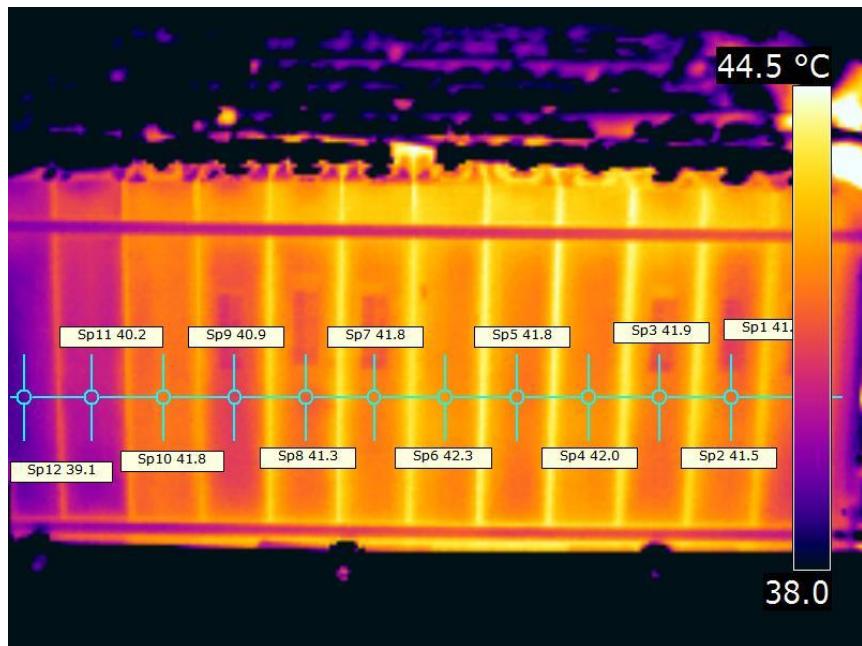
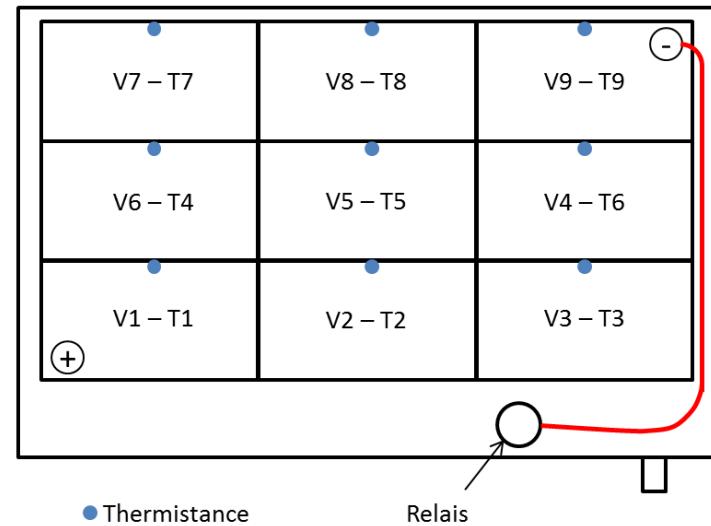


Photo infrarouge de cellules d'un pack batterie après une décharge 2C

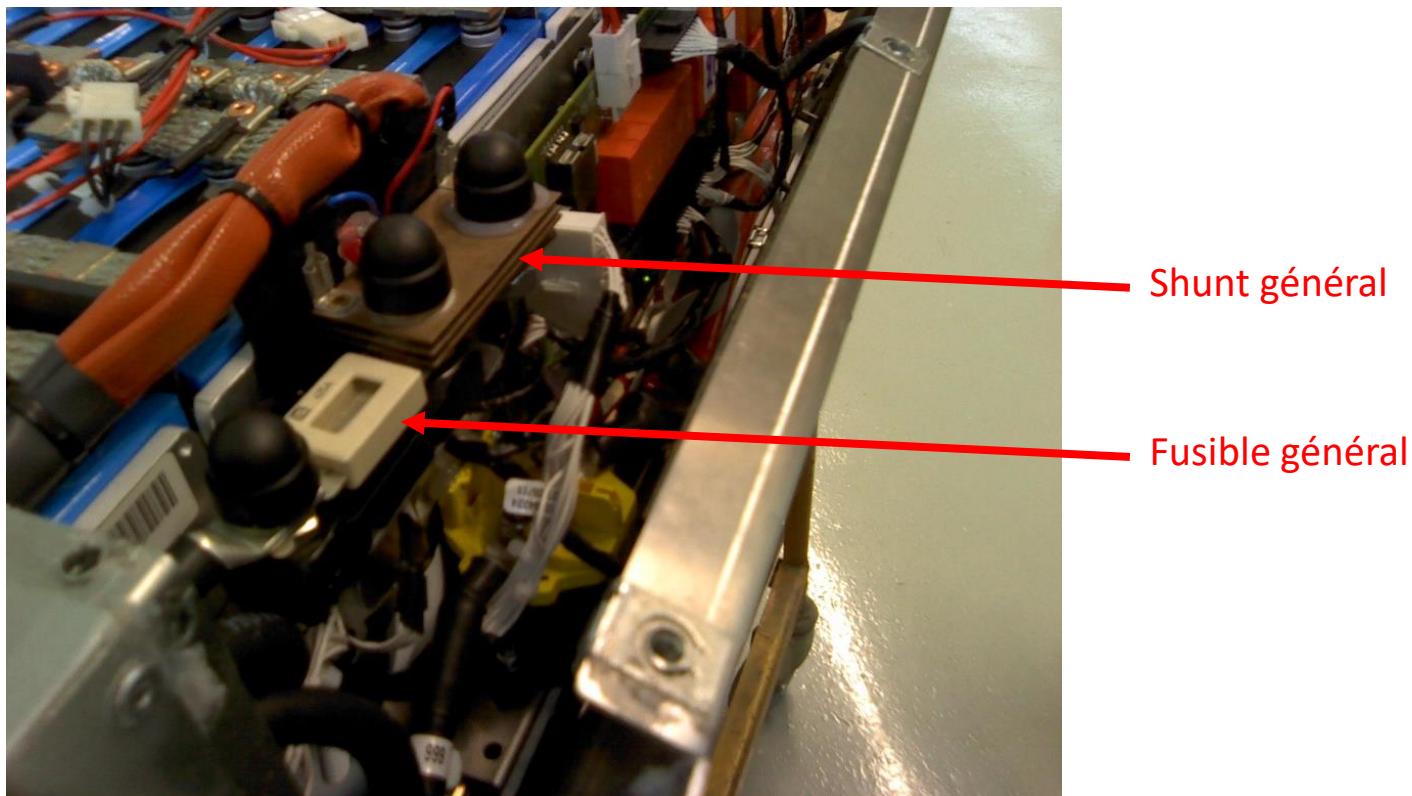


Exemple d'instrumentation (1 thermistance / 4 cellules)



Mesure du courant

- Coût important des shunts de mesure de courant
- Généralement : un seul shunt pour mesurer le courant du pack



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

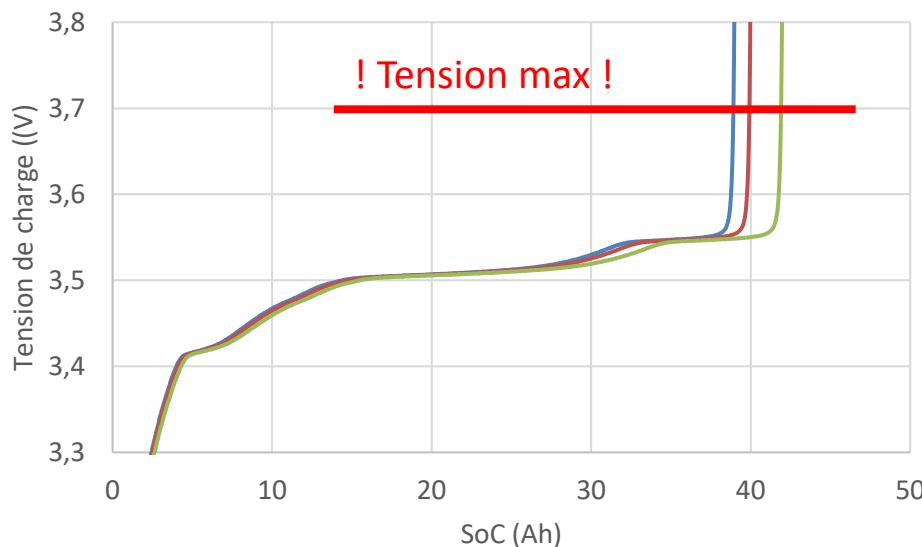
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Fonction d'équilibrage des cellules

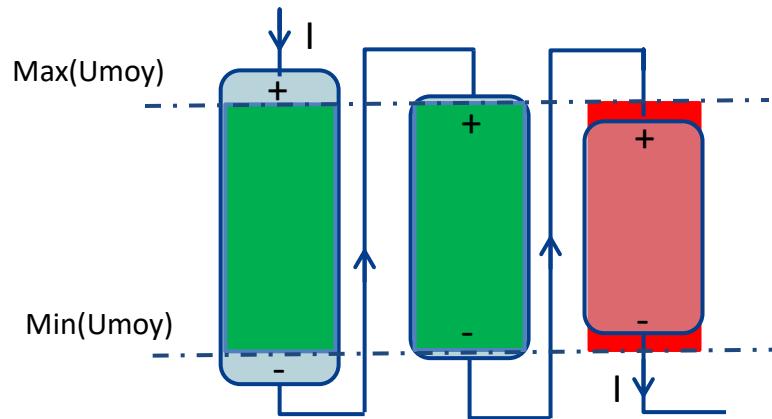
- Dispersion de fabrication des cellules
 - La dispersion des capacités peut atteindre 10% sur un même lot de cellules neuves
- La dispersion des capacités va augmenter (vieillissement)
 - En fonction du niveau de sollicitation des cellules
 - En fonction de la localisation des cellules dans le pack (cellules plus chaudes au centre d'un pack batterie)



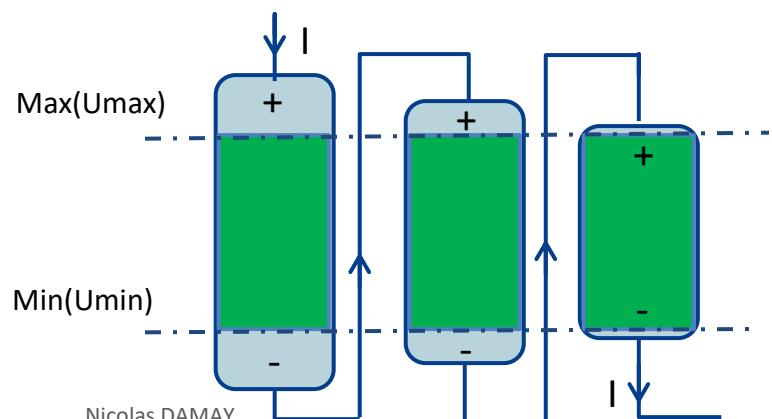
- Capacités différentes
=> limites atteintes à des temps différents
=> pour certaines cellules : $\text{SoC} < 100\%$
=> moins d'énergie stockée
=> besoin « d'équilibrer » les cellules



Exemple : charge de 3 cellules en série de capacités différentes



Si arrêt de la charge sur un critère de tension moyenne
Alors une des cellules passera en surcharge
⇒ Fort risque d'endommagement irréversible
et de destruction probable pour des batteries Li ion



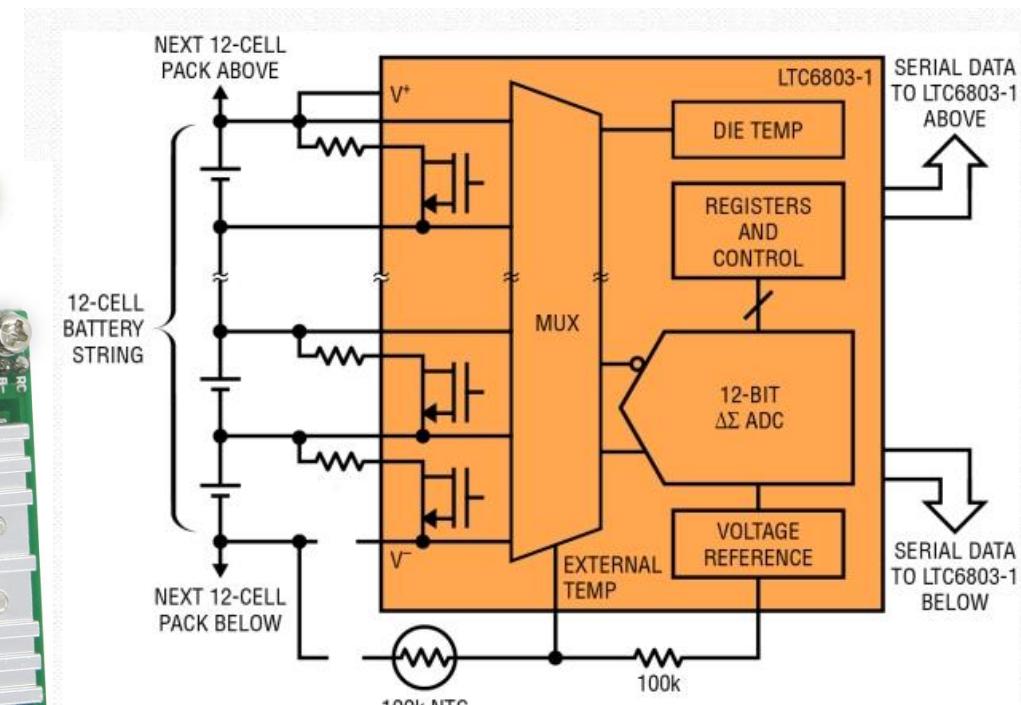
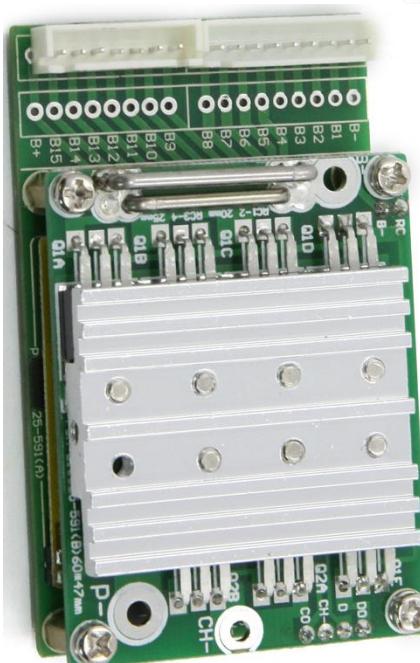
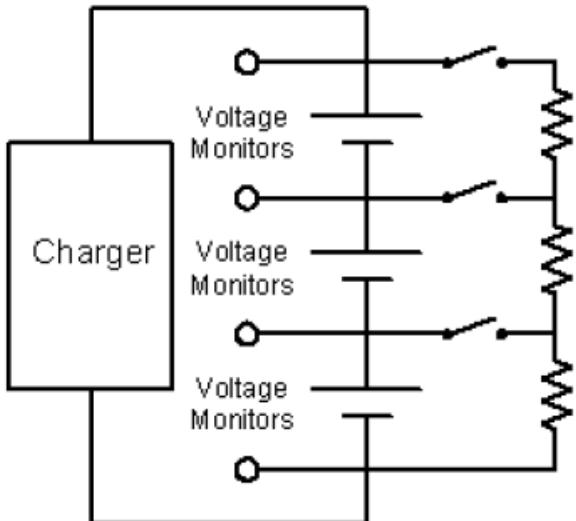
Si arrêt de la charge sur un critère de tension maximale
d'une des cellules
Alors pas de risque de surcharge mais limitation
de la capacité de stockage maximale du pack
Cependant la cellule dont la capacité est la plus faible se
retrouvera systématiquement la plus chargée,
ce qui favorisera d'autant plus son vieillissement

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM



Système d'équilibrage PASSIF (ou dissipatif)

- Dissipation dans des résistances, de l'énergie des cellules les plus chargées
- Dans ce cas l'équilibrage se fait uniquement en recharge
- En décharge, la capacité du pack sera limitée à la cellule de plus faible capacité



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

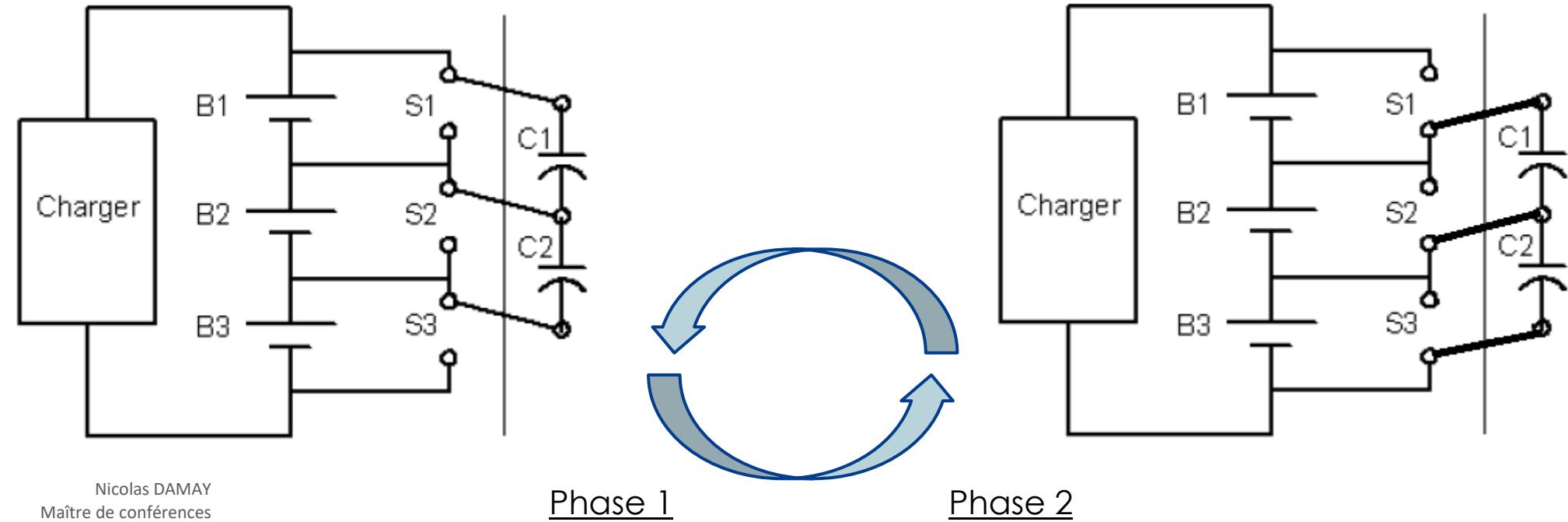
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Système d'équilibrage ACTIF par échange capacitif

- Echange de charge entre étages du pack via des systèmes de stockage intermédiaires
- Pas de dissipation d'énergie (à part dans les interrupteurs)
- Equilibrage à la charge et à la décharge



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

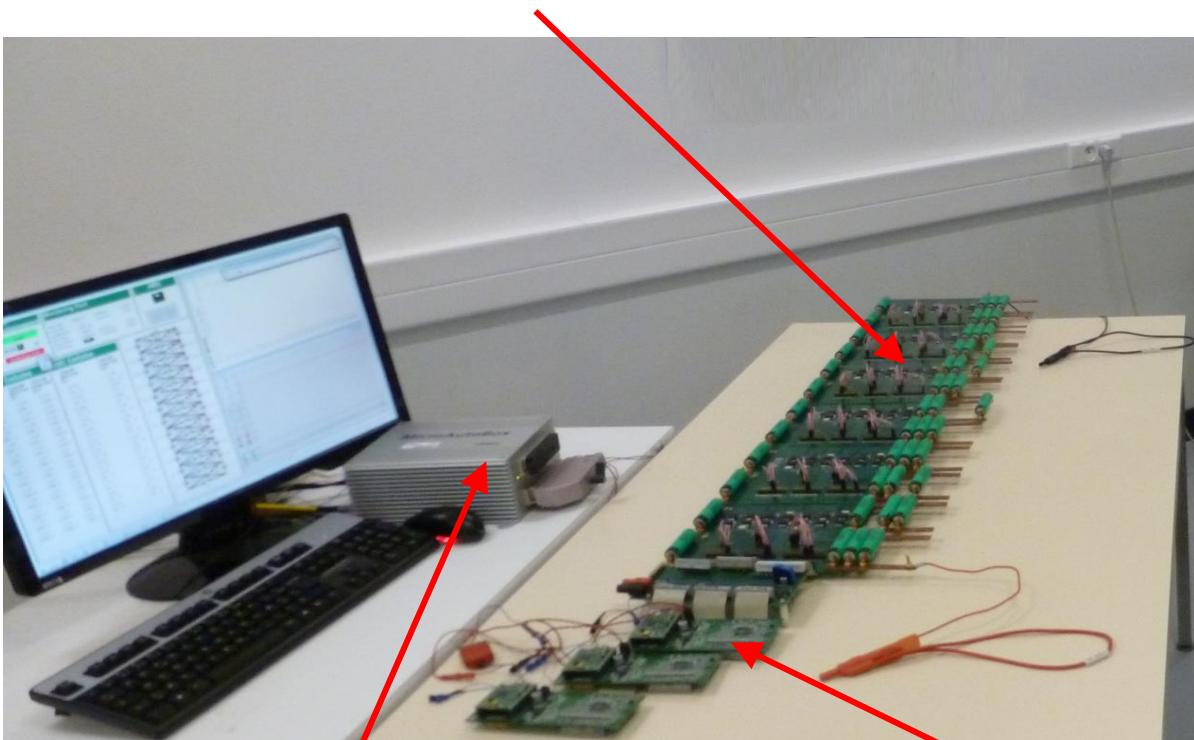
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Equilibrage actif : essais expérimentaux (UTC)

Carte de puissance



M.A.B.X

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

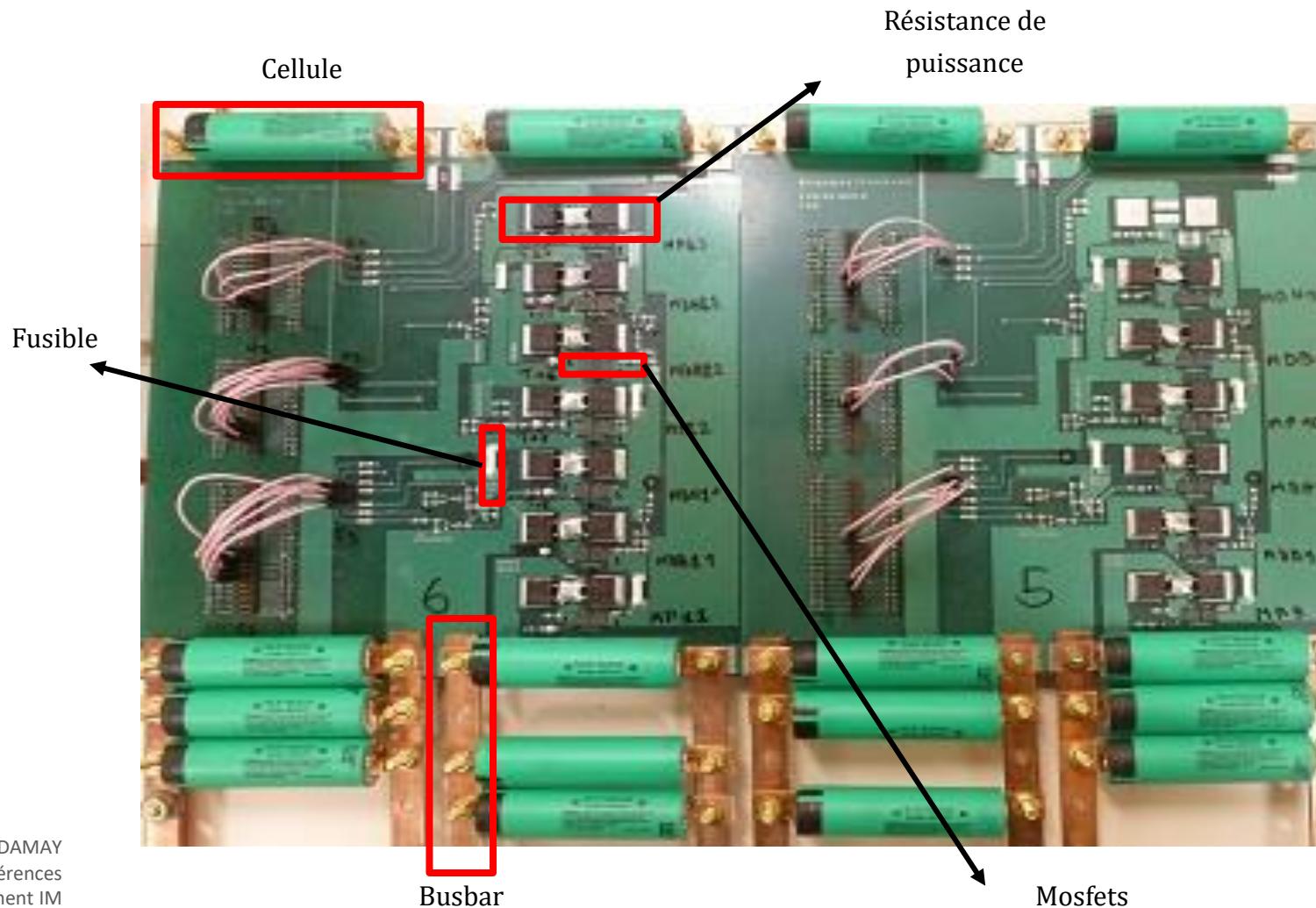
Baie de puissance

Cartes de mesure





Zoom sur prototype d'équilibrage



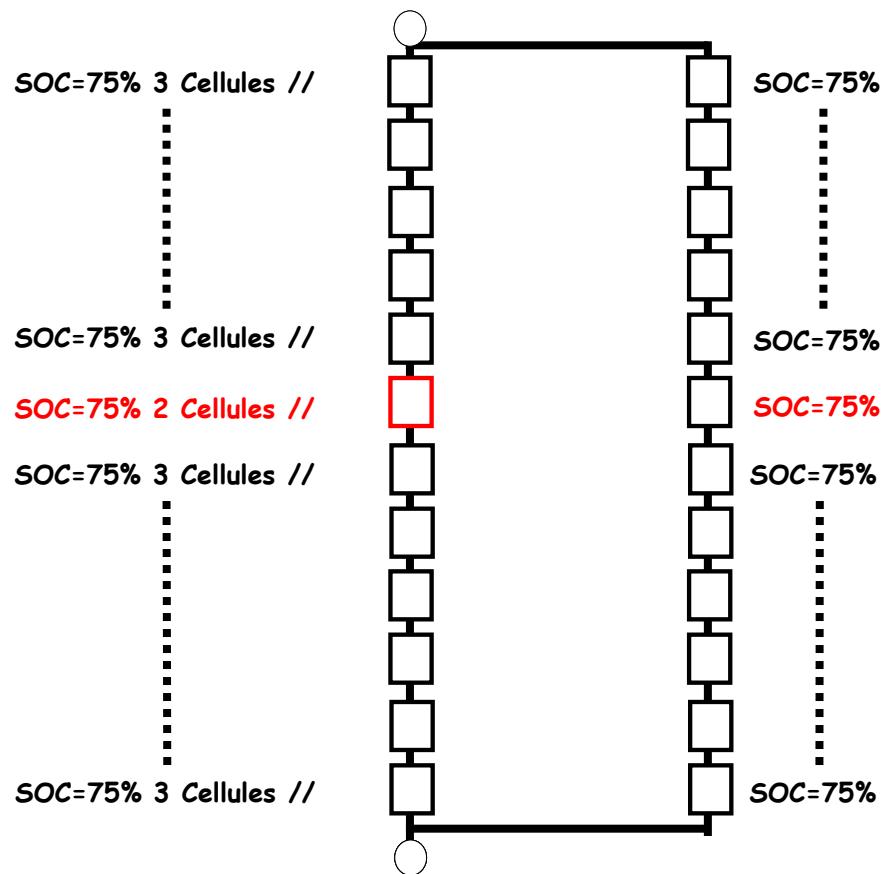
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE



Equilibrage actif : performances lors de cycles NEDC



E dch : 312 Wh

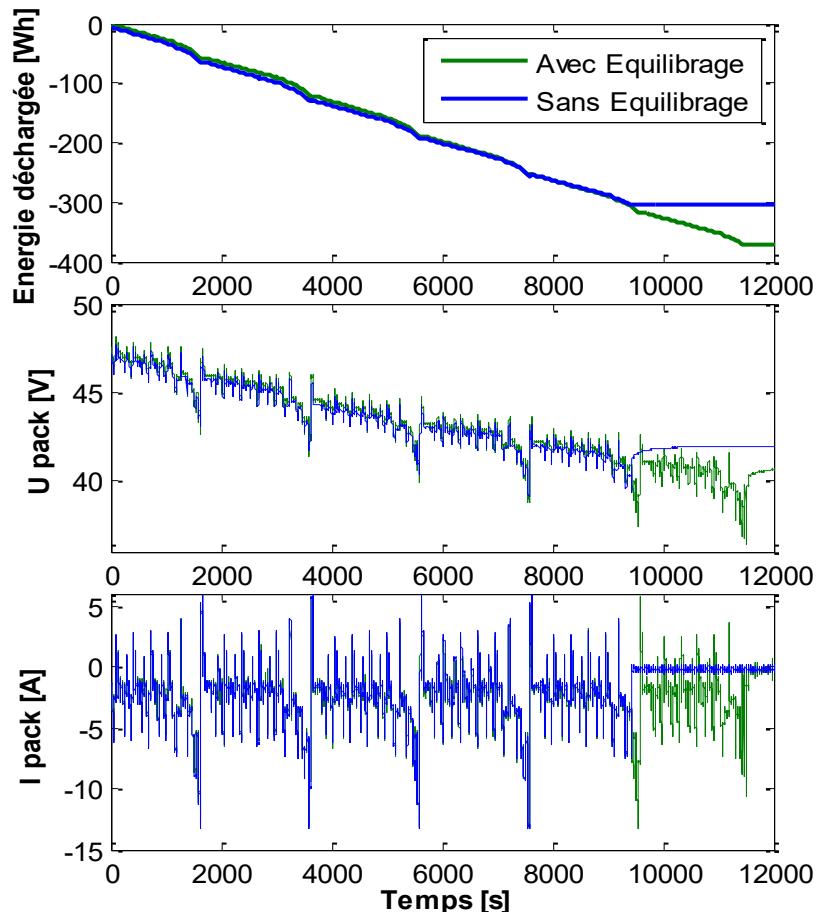
E dch pack avec EQ: 381 Wh

Gain énergétique : 22 [%]

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE





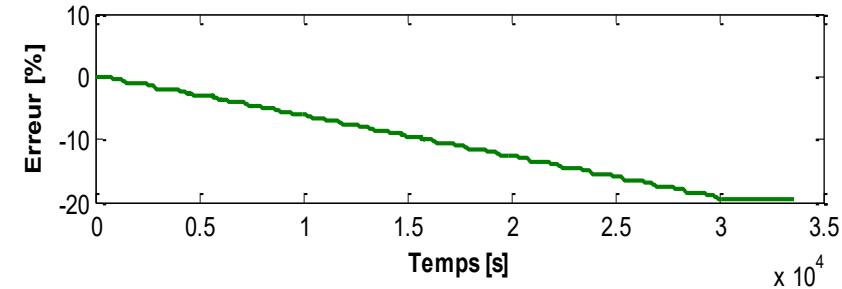
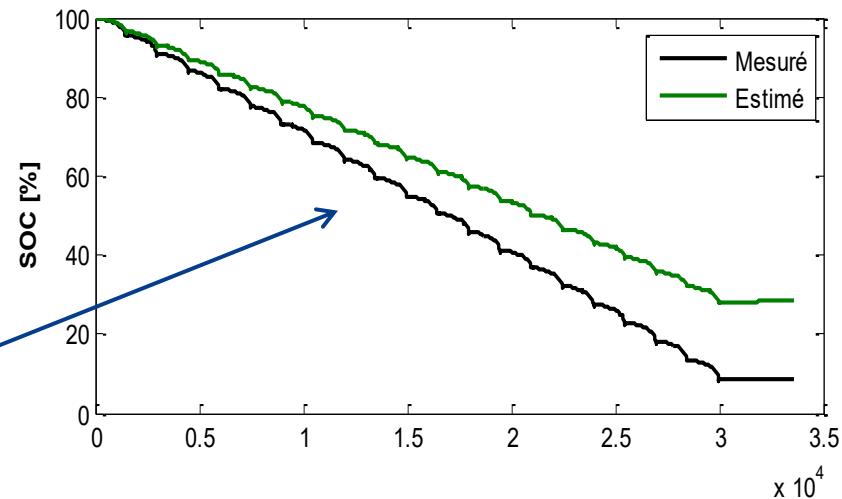
Estimation de l'état de charge : méthode coulométrique

- Principe : comptage des charges entrantes et sortantes de la cellule

- Points remarquables
 - Facilité de mise en œuvre
 - Le SOC initial doit être connu
 - (à recalier par une mesure d'OCV)

- Causes d'erreurs
 - Méconnaissance de la capacité Q
 - Vieillissement
 - Régime de décharge
 - Biais de capteur
 - Erreurs d'initialisation

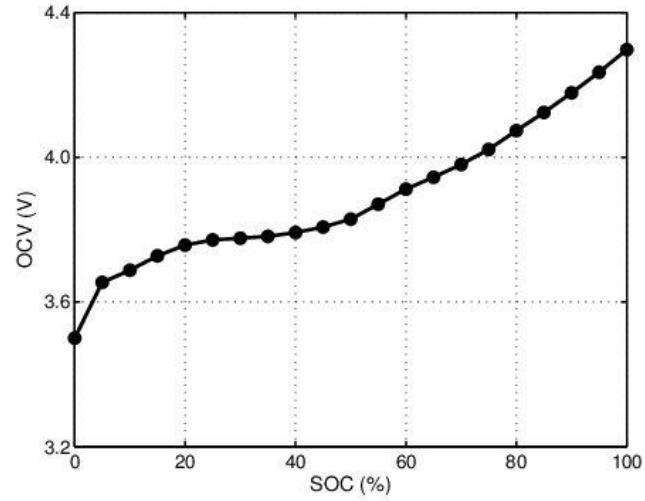
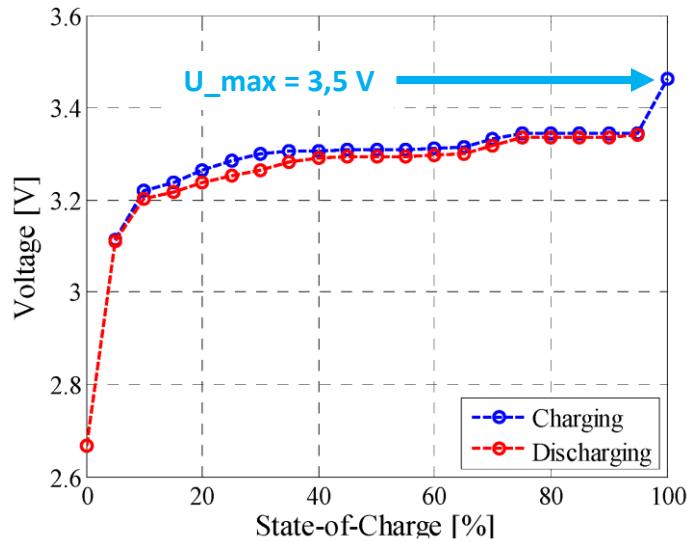
$$SOC(k+1) = SOC(k) + \frac{i(k)T_e}{Q}$$





Estimation de l'état de charge : détermination du SOC à partir d'une simple mesure de tension

- Principe : l'OCV dépend du SoC
- $OCV = f(SoC) \Leftrightarrow SoC = f^{-1}(OCV)$
- Si l'OCV est plat risque de fortes erreurs
 - C'est le cas du LFP/graphite
- Si l'OCV est assez pentu, précision OK
 - C'est le cas de beaucoup de chimie
 - MAIS il faut plusieurs heures pour une bonne mesure
 - (temps de relaxation de l'ordre de 3 à 12h)
 - Parfois impossible de laisser la batterie en circuit ouvert (ex : pacemaker)



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



Estimation de l'état de santé : méthode coulométrique

- Définition de l'état de santé par la perte de capacité Q

$$SoH_Q(t) = \frac{Q_{neuve} - Q_{actuelle}}{Q_{neuve}}$$

- Pour des applications de types traction automobile

- on considère la fin de vie quand $SoH_Q = 80\%$ (*soit 20% de perte de capacité*)
 - Néanmoins une batterie qui dispose encore de 80% de sa capacité initiale, aura certes une autonomie réduite, mais peut encore fonctionner.
 - Utilisation en seconde vie ? (thème de recherche actuel)

- Définition de l'état de santé par l'augmentation de la résistance interne

$$SoH_R(t) = \frac{R_{actuelle}}{R_{neuve}}$$

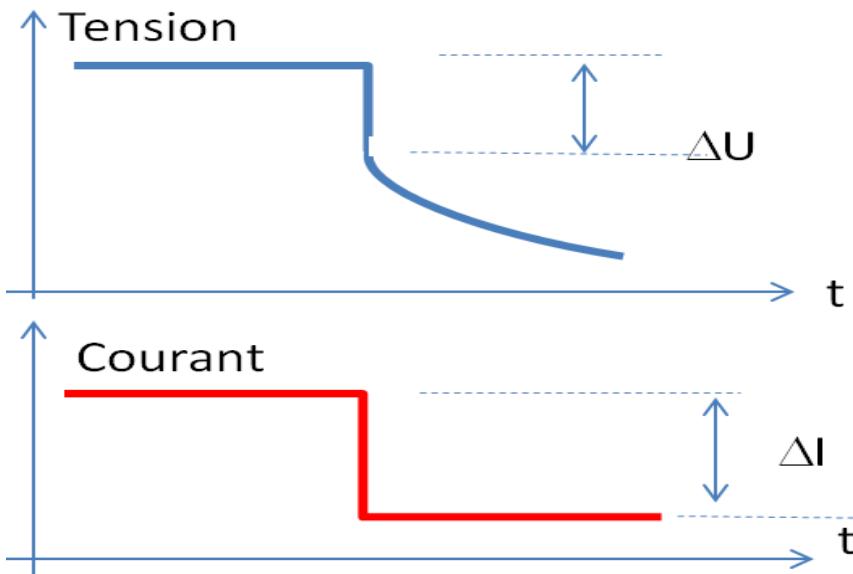
- On considère généralement la fin de vie pour $SoH_R = 200\%$

- Augmentation importante des pertes internes
 - Diminution significative de la puissance instantanée (et de l'énergie utilisable)

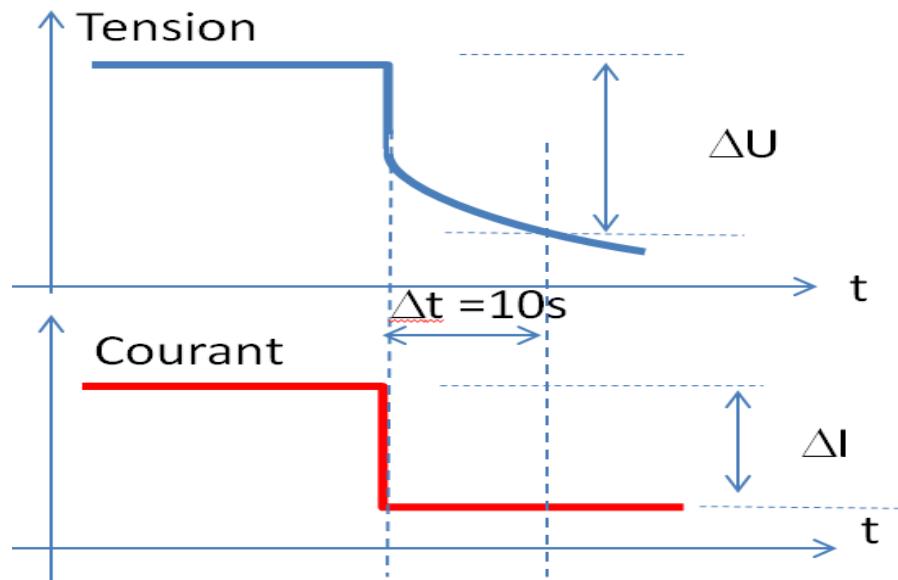


Estimation de la résistance interne en fonctionnement

- Mesure voltampèremétrique
- /!\ La mesure effectuée devra être corrélée en fonction de T°C



Mesure de résistance à 1 seconde



Mesure de résistance à 10 secondes



Recherches à l'UTC

- Méthodes de modélisation et caractérisation des batteries
 - Modèles adaptés aux BMS : électrique + thermique + vieillissement (+ mécanique)
 - Intérêts : meilleur dimensionnement, meilleures performances/durée de vie

Exemples de thèses récentes et actuelles

- **2017-2020 (K. Mergo Mbeya) : Charge « au plus juste » de batteries LFP/graphite**
 - Charge de +80% en 10 min @ 0 °C // Charge de 30% en 2 min à 25 °C
- **2019-2022 (F. Vendrame) Batterie de secours d'avion**
 - Garantie que la batterie pourra effectuer sa « mission » à l'aide d'un modèle
- **2020-2023 (H. Rabab) Batterie sodium-ion (avec la société Tiamat à Amiens)**
 - Modélisation pour le diagnostic des états de charge et de santé
- **2021-2025 (J. Kozma) Analyses thermiques de batteries**
 - Obtention de grandeurs physiques utiles à la compréhension et au diagnostic
- **2023-2026 (G. Bakaraki) Modèles robustes au vieillissement (avec la société SAFRAN)**
 - Adaptation des modèles à l'évolution de la batterie pour garantir la fiabilité dans le temps
- **2024-2027 (A. Al Khatib) Modélisation hétérogène pour la très forte puissance**
 - Aide à la compréhension des limitations physiques lors de charges ultra-rapides
 - Contexte : projet franco-allemand HIPOBAT (batteries tout-solide, 12 laboratoires)
- **2025-2028 (S. Al Ayoubi) Modélisation du vieillissement de batteries sodium-ion**
 - Evolution des comportements électriques, thermiques et mécanique, en charge ultra-rapide
 - Contexte : réalisation d'un bus électrique à charge ultra-rapide (3 partenaires industriels)

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

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

Cours SY03 : éléments de protection et de surveillance des SEE