

Les essais abusifs dans l'étuve (test au four)

La description des essais de surchauffe dans l'étuve a été présentée dans le chapitre 2. Ces essais thermiques abusifs ont été réalisés dans le cadre de la validation du modèle de l'emballage thermique à l'échelle des cellules. La première partie de cette section présente une analyse qualitative basée sur les observations et mesures réalisées avant et après les essais effectués sur les 3 technologies de cellules testées. L'analyse des résultats expérimentaux permettant d'identifier les paramètres du profil de stabilité thermique des cellules testées est ensuite exposée. Enfin, la dernière partie de cette section compare les résultats des essais sur des cellules neuves et des cellules vieilles de chacune des 3 technologies de cellules.

4.1 Caractéristiques des cellules neuves avant et après essai

Pour caractériser les cellules testées, on a procédé de la même manière que pour les tests dans le BTC. Les opérations suivantes ont été réalisées avant et après chaque essai : clichés photographiques, mesures de la masse, des dimensions et de la tension aux bornes des cellules. Les données relatives à 3 cellules testées, une de chaque technologie étudiée, sont présentées dans le Tableau 3.10 à titre d'exemple. En comparant ce tableau au tableau 5 (Cf. section 3.1) concernant les essais dans le BTC, on constate que les grandeurs mesurées ont des valeurs très similaires, ceci pour chaque technologie.

Tableau 3.10. Caractéristiques des cellules avant et après l'essai dans l'étuve

Caractéristiques	Avant essai			Après essai		
	Masse (g)	Dimensions (mm)	Tension (V)	Masse (g)	Dimensions (mm)	Tension (V)
BAT709 A123s (2,3 Ah)	77,24	26*65	3,369	64,96	27*67	0
BAT260 LifeBatt (15 Ah)	453,54	41*165	3,33	377,49	41*166	0
BAT002 PurePower (30 Ah)	788,71	298*170*11	3,99	587,98	285*166*54	0

4.2 Analyse des résultats des essais

Le programme de chauffe appliqué au niveau de l'étuve a été exposé dans le chapitre 2 (Cf. section 2.3.1). L'étuve est préchauffée à 35°C, température maintenue pendant 60 minutes, puis l'étuve est chauffée jusqu'à 200°C avec une vitesse de chauffe de 5°C/min. Dès que la température de la cellule atteint 200°C, une période de stabilisation de 120 minutes est observée pour s'assurer que la réaction de la cellule est complète, et la chauffe de l'étuve est alors stoppée. L'évolution de la température lors des essais a été enregistrée en utilisant dix thermocouples (cinq thermocouples répartis sur la surface de la cellule, quatre autres répartis dans le bac de rétention dans l'étuve. La Figure 3.25 montre les résultats d'un essai où l'on voit clairement des différences entre les températures mesurées par les différents thermocouples, que ce soit ceux positionnés sur la surface de

la cellule ou ceux installés dans le bac de rétention de l'étuve. Ces différences peuvent s'expliquer par les raisons suivantes :

1. L'étuve étant assez volumineuse, l'homogénéité de la dissipation de chaleur est discutable.
2. L'ouverture de l'évent n'est principalement détectée que par le thermocouple positionné près de la borne positive qui mesure une baisse de température.
3. Le décollage de certains thermocouples collés sur la surface de la cellule, suite à l'ouverture de l'évent qui provoque une pression importante, induit une sous-estimation de la température de la cellule.
4. Des pertes thermiques sont provoquées par une légère ouverture de la porte de l'étuve autour d'une température ambiante de 170°C-180°C à cause de la dilatation de la porte due à la chaleur. Ces pertes thermiques ont été minimisées par un maintien renforcé de la porte de l'étuve.
5. L'ouverture des soudures au niveau des cellules PurePower en sachet a engendré systématiquement le décollage de plusieurs thermocouples de la surface des cellules.

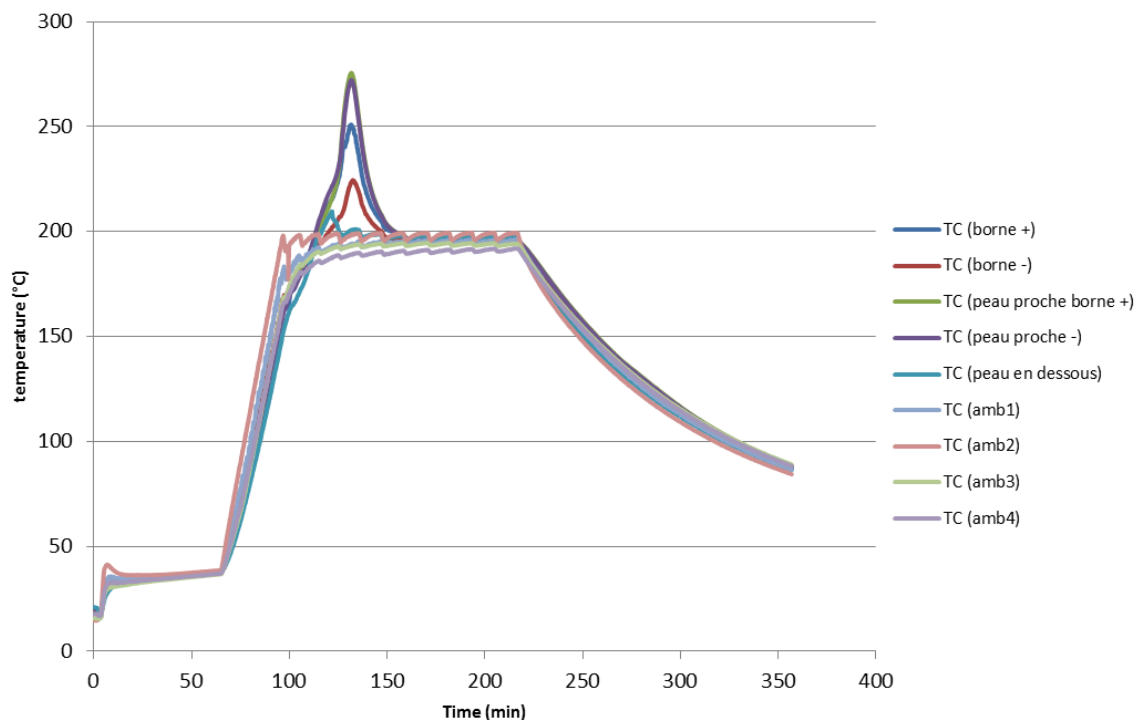


Figure 3.25. Evolution de la température dans la cellule et au sein de l'étuve lors d'un essai avec une cellule A123s neuve

Les résultats des essais pour les 3 technologies, y compris les essais de reproductibilité, sont discutés ci-après. La température de surface présentée dans les résultats est la valeur moyenne des températures mesurées par les thermocouples collés à la surface de la cellule testée. La température de stabilisation a été réduite à 60min dans certains essais, le but est de gagner en temps étant donné que l'emballement thermique se produit durant les 120 premières minutes de l'essai.

4.2.1 Analyse des résultats d'essais des cellules A123s

Dans la Figure 3.26, un seul essai concernant les cellules A123s est présenté car la reproductibilité des essais n'a pas été satisfaisante à cause du décollement de tous les thermocouples de la surface de la cellule.

Le départ en emballement thermique survient autour de 173°C après 101min de temps d'essai. D'après la Figure 3.26 ce temps correspond également à la chute de la tension de cellule. Quant à la température maximum enregistrée, elle a atteint 255°C au bout de 7896 s.

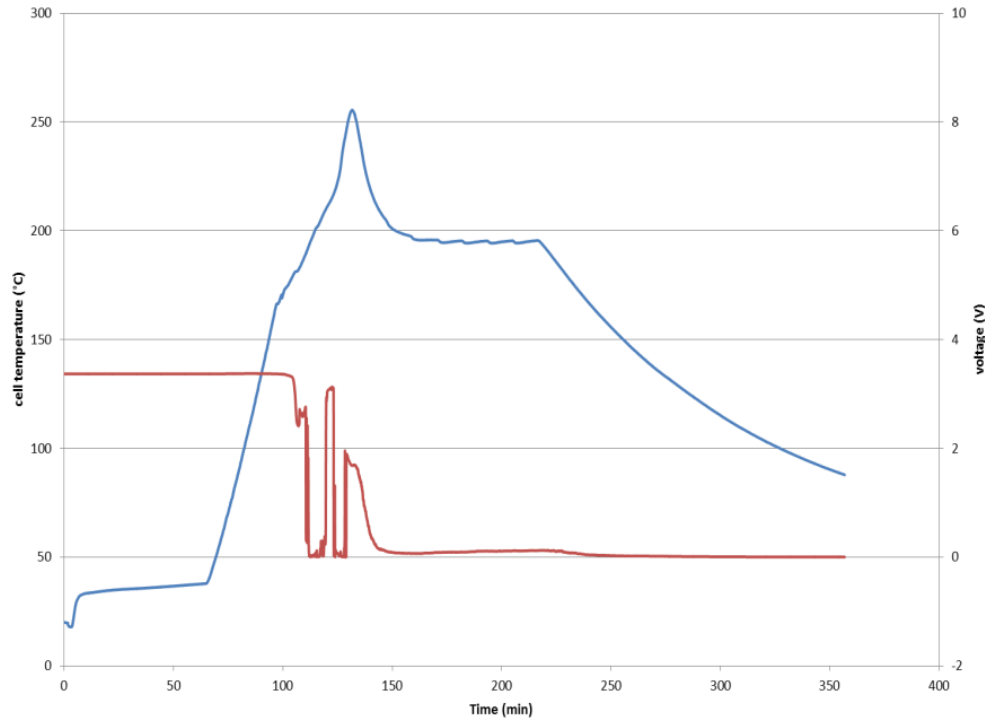


Figure 3.26. Evolution de la température et de la tension d'une cellule A123s neuve (BAT709) lors d'un essai dans l'étuve

4.2.2 Analyse des résultats d'essais des cellules LifeBatt

Pour les cellules LifeBatt neuves, deux essais sur trois ont été satisfaisants. Les évolutions de la température et de la tension des deux cellules retenues sont présentées dans la Figure 3.27. On peut constater que les réponses thermiques des deux cellules sont assez similaires. Les chutes de tension des cellules surviennent après le même temps d'essai, autour de 6500 s. On remarque aussi que l'accélération de l'emballement thermique a été un peu retardée pour la cellule BAT260 en comparaison de la cellule BAT319. Les températures maximales atteintes par ces cellules sont très voisines, autour de 280°C.

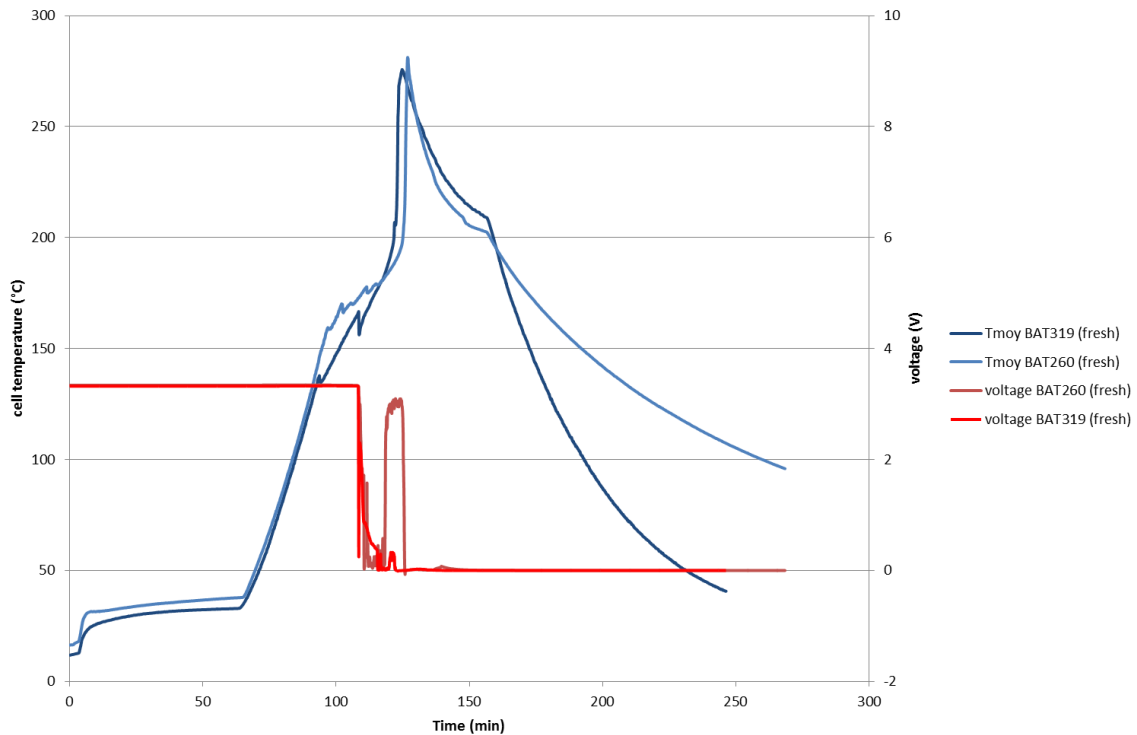


Figure 3.27. Evolution de la température et de la tension de cellules LifeBatt neuves lors d'un essai dans l'étuve

4.2.3 Analyse des résultats d'essais des cellules PurePower

Comme pour les essais dans le BTC, les cellules PurePower ont montré une très grande réactivité. L'ouverture des soudures du packaging de la cellule a engendré le décollage de la quasi-totalité des thermocouples lors de chaque essai. On a constaté en effet qu'après chaque essai, un ou deux thermocouples seulement (numérotés 3, 4, 5 dans la Figure 3.28) étaient encore collés sur la surface de la cellule. C'est pourquoi les températures exploitées dans les résultats relatifs aux essais dans l'étuve sont soit la température enregistrée du seul thermocouple encore en place, soit la moyenne des températures des thermocouples encore collés.

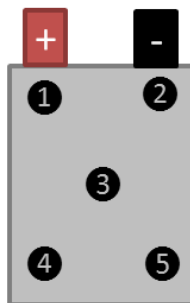


Figure 3.28. Représentation d'une cellule PurePower instrumentée avec 5 thermocouples pour l'essai dans l'étuve

Dans la Figure 3.29, qui montre l'évolution de la température et de la tension de deux cellules PurePower neuves, on voit clairement la forte réactivité de ces cellules qui se traduit par le démarrage quasi-instantané de l'emballement thermique entre 180°C et 190°C. La cellule BAT001 a montré une réactivité plus importante que la cellule BAT770, avec un démarrage de l'emballement plus précoce et une température maximale de 377°C contre 309°C pour la cellule BAT770. La chute de la tension de cellule, quant à elle, s'est manifestée brusquement au niveau des deux cellules après presque la même

durée d'essai mais curieusement la cellule BAT770 ne s'est emballée que 450 s après la chute de tension contrairement à la cellule BAT001 qui s'est emballée quasiment en même temps.

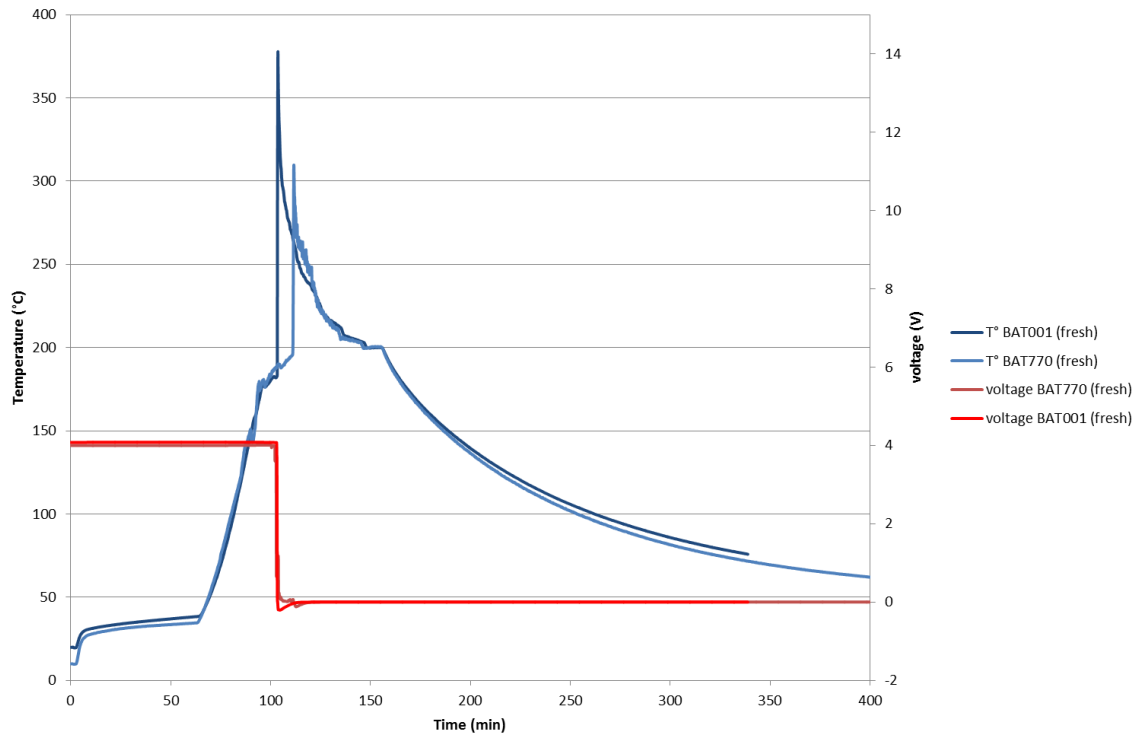


Figure 3.29. Evolution de la température et de la tension des cellules PurePower neuves lors d'un test dans l'étuve

4.3 Influence du vieillissement calendaire sur l'emballlement thermique

Les cellules vieilles de chacune des trois technologies ont été également testées dans l'étuve pour étudier qualitativement l'influence du vieillissement sur le déclenchement de l'emballlement thermique des cellules étudiées.

4.3.1 Influence du vieillissement pour les cellules A123s

L'évolution des températures de toutes les cellules neuves et vieilles testées dans l'étuve est présentée dans la Figure 3.30. Les profils de température sont assez similaires ; on observe une reproductibilité meilleure pour les cellules vieilles à 30 % de perte de capacité que pour celles vieilles à 10 %. Même si le départ de l'emballlement thermique au sein des deux cellules vieilles à 10 % de perte de capacité a eu lieu quasiment après la même durée de test et à une température très voisine, la cellule BAT699 a montré une réactivité plus importante, avec une température maximale de 280°C contre 230°C pour la cellule BAT690.

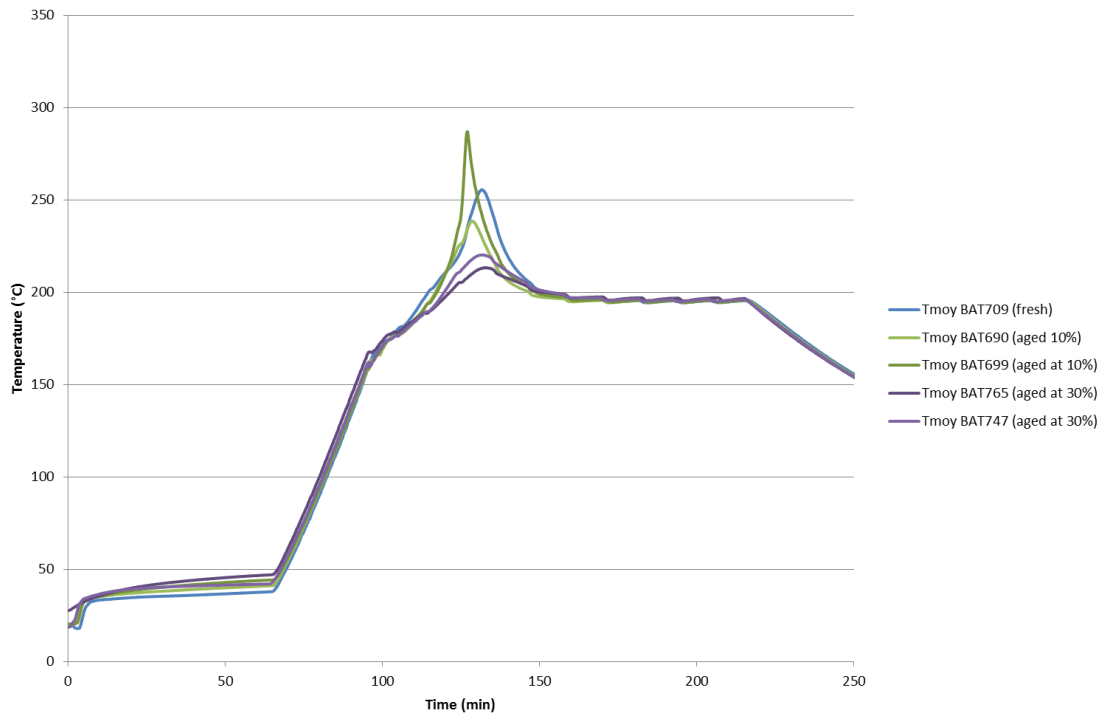


Figure 3.30. Evolution de la température des cellules A123s neuves et vieilles pendant les tests dans l'étuve

On constate également que le temps critique d'essai pour atteindre l'emballage thermique augmente quand on passe de la cellule neuve, aux cellules vieillies à 10 % de perte de capacité et enfin aux cellules vieillies à 30 %. On constate également que les températures de déclenchement de l'emballage thermique accéléré sont croissantes, de la cellule neuve aux cellules vieillies à 10 % de perte de capacité et aux cellules vieillies à 30 %. Il faut noter qu'il est difficile d'observer les pics endothermiques à travers les résultats des essais dans l'étuve sur les cellules A123s

Tableau 3.11 : Temps et température critiques de l'emballage thermique des cellules A123s neuves et vieilles dans l'étuve

A123s		t_3 (s)	T_3 (°C)
Neuve	BAT709	6085	173.9
Vieillies à 10 %	BAT699	6477	181.1
	BAT690	6305	177.5
Vieillies à 30 %	BAT747	6884	189
	BAT765	6802	188.8

4.3.2 Influence du vieillissement pour les cellules LifeBatt

Comme pour les cellules A123s, l'évolution des températures de toutes les cellules neuves et vieillies testées dans l'étuve est illustrée dans la Figure 3.31. La reproductibilité est assez satisfaisante pour les cellules neuves et vieillies à 30 % de perte de capacité mais elle est moins bonne pour les

cellules vieilles à 10 %, ce qui s'explique par le décolllement de la plupart des thermocouples dans le cas de la cellule BAT390. Néanmoins, on peut constater que l'emballement thermique est retardé dans les cellules vieilles puisqu'il se produit dans l'ordre croissant des durées d'essai, en premier dans les cellules neuves, ensuite dans les cellules vieilles à 10 % et enfin dans les cellules vieilles à 30 %.

Comme on l'a constaté lors des essais dans le BTC, le pic endothermique lié à la fusion du séparateur et à l'ouverture de l'évent est plus marqué dans les cellules LifeBatt. Le zoom sur l'évolution de la température des cellules LifeBatt inséré dans la Figure 3.31 montre clairement que les pics endothermiques sont étroitement liés au démarrage de l'emballement thermique ($T_3 = T_2$) qui est plus rapide pour les cellules vieilles à 30 % de perte de capacité.

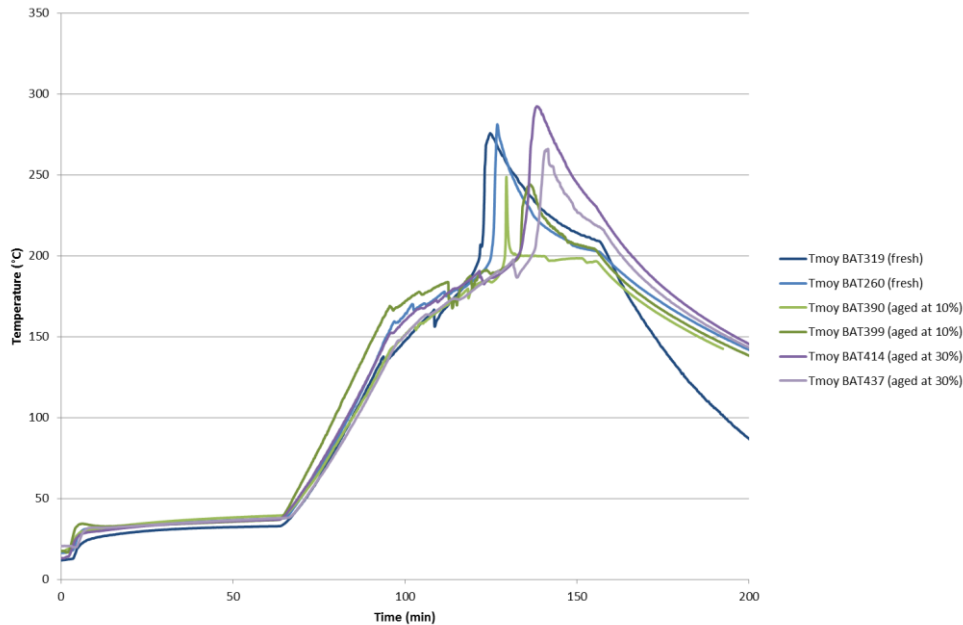


Figure 3.31. Evolution de la température des cellules LifeBatt neuves et vieilles pendant les tests dans l'étuve

Le Tableau 3.12 présente les durées d'essai t_2 et températures T_2 où l'on détecte les différents pics endothermiques lors de ces essais. On peut constater que le phénomène endothermique se manifeste à des durées d'essai croissant avec le vieillissement des cellules : d'abord dans les cellules neuves, ensuite dans les cellules vieilles à 10 % de perte de capacité, et enfin dans celles vieilles à 30 %. Ces résultats renforcent les observations faites lors des essais dans le BTC, où l'on a constaté que pour les cellules A123s et LifeBatt, le pic endothermique marquant le départ de la fusion du séparateur a lieu à des températures plus élevées pour les cellules vieilles du fait du vieillissement du séparateur.

Tableau 3.12 : Temps et température critiques des réactions endothermiques détectées pour les cellules LifeBatt neuves et vieilles dans l'étuve

LifeBatt		T ₂ (s)	T ₂ (°C)
Neuve	BAT260	6497	166
	BAT319	6681	177
Vieilles à 10 %	BAT390	7072	178
	BAT399	6697	183
Vieilles à 30 %	BAT414	7268	189
	BAT437	7890	197

4.3.3 Influence du vieillissement pour les cellules PurePower

Les tests dans l'étuve des cellules PurePower ont été plus satisfaisants que ceux effectués dans le BTC. Comme on l'a mentionné précédemment, bien que la plupart des thermocouples se soient décollés lors des essais, ceux qui sont restés bien collés nous ont permis d'obtenir des données exploitables, avec une reproductibilité assez satisfaisante. La Figure 3.32 montre en effet que le départ en emballement thermique des cellules vieilles à 20 % et 50 % de perte de capacité sont bien reproductibles, avec un départ plus rapide pour les cellules vieilles à 20 %. La reproductibilité est moins bonne pour les cellules neuves. Toutefois, nous ne pouvons pas conclure de façon définitive sur l'influence du vieillissement sur l'emballement, même si l'on peut penser que l'emballement est retardé pour les cellules vieilles. Les valeurs maximales atteintes, quant à elles, sont très élevées, entre 300°C et 400°C.

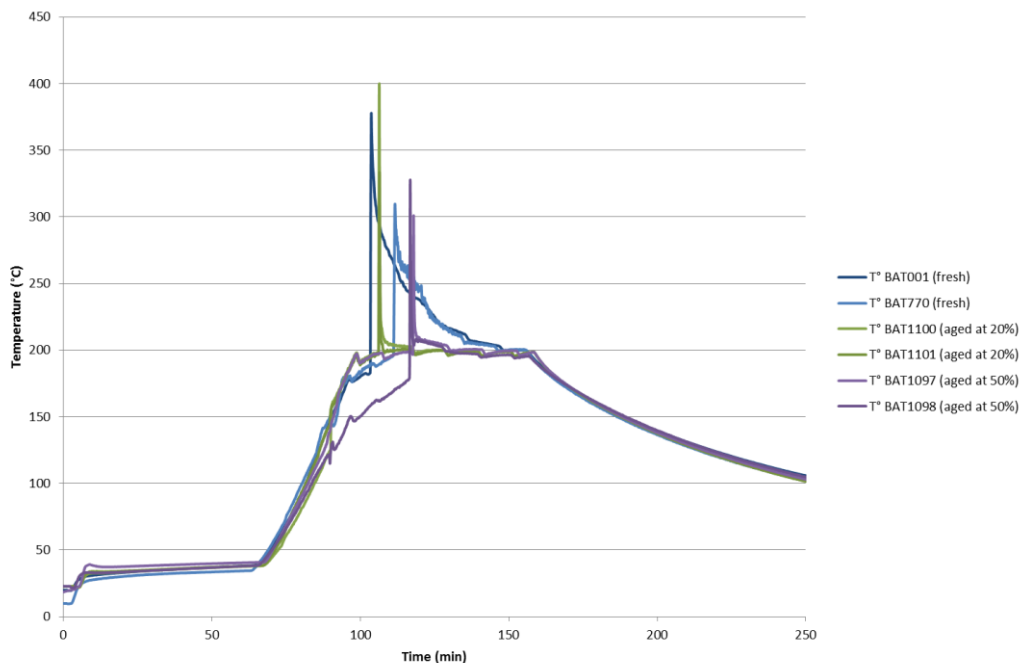


Figure 3.32. Evolution de la température des cellules PurePower neuves et vieilles pendant les tests dans l'étuve

Les données relatives au départ de l’emballage thermique lors des essais dans l’étuve sont résumées dans le Tableau 3.13. On peut constater que le seuil de température du déclenchement de l’emballage thermique varie très peu entre les différentes cellules au même état de vieillissement, à l’exception des cellules vieilles à 50 % de perte de capacité. On note en effet 13°C de différence entre les deux cellules neuves, seulement 2°C entre les cellules vieilles à 20 %, contre 18°C entre les cellules vieilles à 50 %. Par ailleurs, les temps critiques correspondant au départ en emballage sont très proches pour un état de vieillissement donné, pour les cellules vieilles à 20 % et celles vieilles à 50 %. Ce n’est pas le cas des cellules neuves, où l’on note une différence de temps importante, de l’ordre de 500 s.

Tableau 3.13 : Temps et température critiques de l'emballage thermique des cellules PurePower neuves et vieilles dans l'étuve

PurePower		t_3 (s)	T_3 (°C)
Neuves	BAT770	6637	195
	BAT001	6138	182
Vieilles à 20 %	BAT1100	6328	198
	BAT1101	6305	196
Vieilles à 50 %	BAT1097	7047	197
	BAT1098	6990	179

5 Les essais abusifs à l'échelle des modules

Dans le cadre de l'extension du modèle de l'emballage thermique à l'échelle du module, qui consiste à modéliser la propagation de l'emballage d'une cellule à ses voisines au sein du module, des tests abusifs ont été effectués sur des modules constitués par les cellules des 3 technologies, A123s, LifeBatt et PurePower. Le montage des modules, ainsi que les protocoles expérimentaux, ont été exposés dans le chapitre 2 (section 2.3.2).

On présentera dans cette partie les résultats des tests de surcharge effectués sur les trois modules (A123s, LifeBatt, PurePower). Les tests de surchauffe sur un module LifeBatt seront ensuite introduits.

5.1 Test de surcharge sur un module A123s

Comme il a été mentionné dans le chapitre 2, la surcharge est un moyen d'activation appliqué pour initier l'emballage thermique de l'une des cellules qui constituent le module étudié. Dans cette étude, la cellule A123s installée au milieu du module a subi une surcharge de 3C sans limite de tension.

A partir des clichés photographiques pris avant et après l'essai (Cf. *Figure 3.33*), et grâce à la vidéo de l'enregistrement, on peut identifier les différents événements qui ont eu lieu lors de l'essai. On constate que la cellule surchargée (celle du milieu) a réagi très fortement ; elle s'est ouverte latéralement du côté de la borne positive et sa partie spiralée interne a été totalement éjectée et déroulée à l'extérieur du cylindre (Cf. images 2 à 5 de la *Figure 3.33*). Cette partie spiralée imbibée d'électrolyte a pris feu lors de l'essai (Cf. image 1 de la *Figure 3.33*).

Bien que l'emballage thermique dans la cellule ait été important, avec un départ de feu impressionnant, celui-ci ne s'est pas propagé aux cellules voisines. Les mesures de tension de l'ensemble des cellules rassemblées dans le *Tableau 3.14* montrent que les tensions des cellules non surchargées n'ont que légèrement diminué, seule la cellule surchargée (n°7) ayant une tension nulle. Ceci est dû au fait que l'éjection de la partie active spiralée a isolé le feu à l'extérieur de la cellule, le cylindre isolant ne subissant pas de dommages importants. Une fois l'électrolyte consommé, le feu s'est arrêté et n'est donc resté en contact direct avec les cellules voisines que pendant quelques minutes.

Tableau 3.14 : Tension des cellules avant et après l'essai de surcharge du module A123s

Cellules	Tension (V) avant essai	Tension (V) après essai
1	3,297	3,251
2	3,297	3,290
3	3,297	3,290
4	3,297	3,290
5	3,297	3,290
6	3,297	3,238
7	3,297	0

Avant



Après



Figure 3.33. Clichés photographiques avant et après essai du module A123s

Les observations avancées ci-dessus ont été confortées par les données de l'évolution des températures enregistrées au cours de l'essai. Ces résultats sont rassemblés dans la Figure 3.34, où les graphes 1 à 6 donnent les températures des trois thermocouples des 6 cellules périphériques, et le graphe 7 celles des deux thermocouples de la cellule surchargée. On distingue clairement sur le graphe 7 l'ouverture de l'évent qui se traduit par la baisse de température mesurée par le thermocouple proche de la borne positive (en rouge). L'ouverture de l'évent précède le départ du feu qui provoque une montée très importante de la température au niveau de la cellule surchargée mais aussi au niveau des cellules dont les thermocouples étaient en contact direct avec les flammes (dépassant 600°C dans la cellule n°1). Cependant, si l'on considère les températures mesurées par les thermocouples qui n'ont pas été en contact avec les flammes, on constate que celles-ci ne dépassent pas 30°C, soit une augmentation moyenne de 10°C lors de l'emballement de la cellule surchargée.

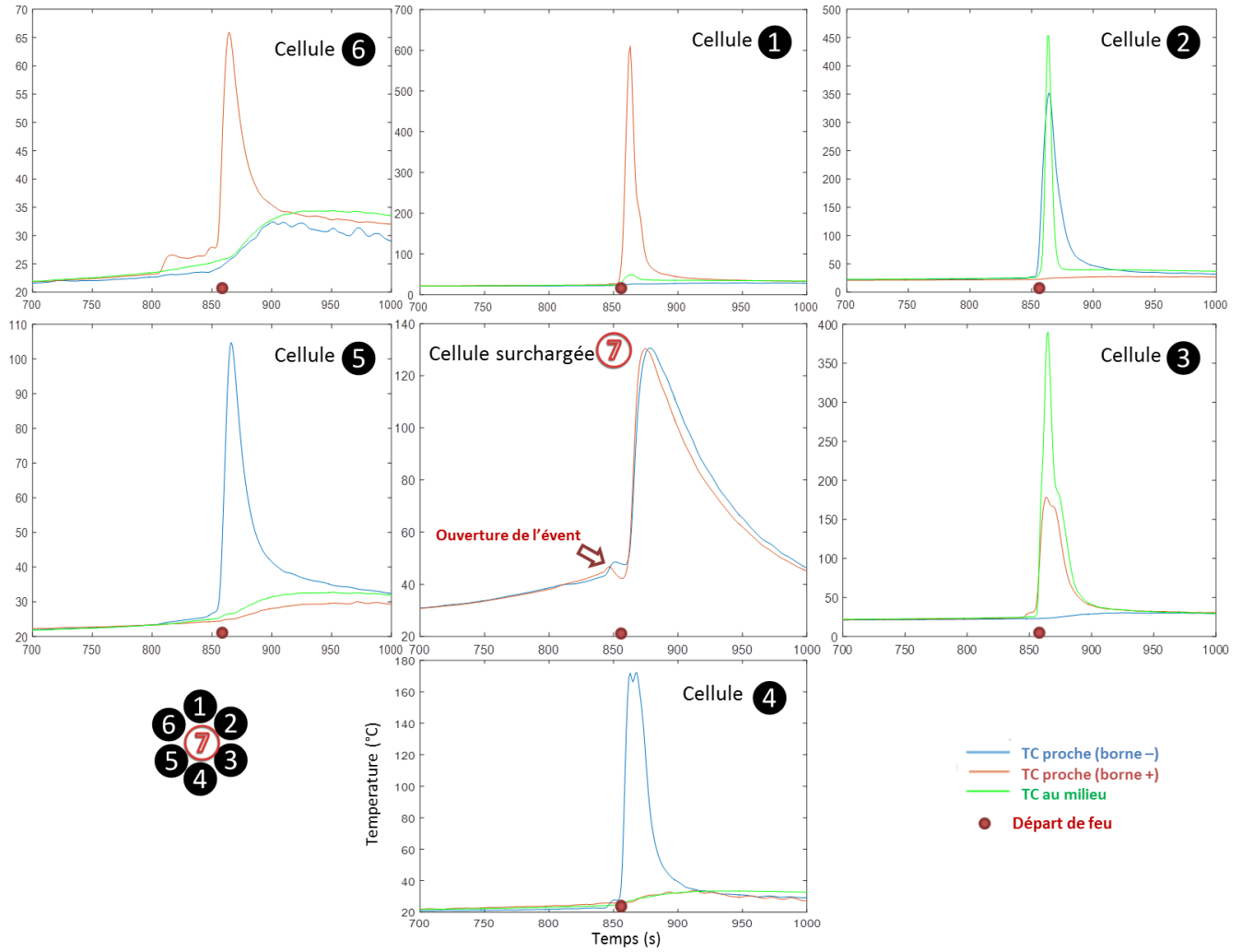


Figure 3.34. Evolution des températures des cellules constituant le module A123s lors de l'essai de surcharge

5.2 Essai de surcharge sur un module LifeBatt

L'essai sur le module LifeBatt a suivi le même protocole de surcharge (3C sans limite de tension) et les mêmes conditions opératoires de mesure des températures des différents thermocouples. La numérotation des cellules est la même que pour le module A123s (Cf. Figure 3.36). Il faut noter que la température initiale des cellules était seulement de 11°C contre 20°C pour le module A123s (conditions ambiantes différentes).

Contrairement au module A123s surchargé dans l'essai précédent, le module LifeBatt n'a pas subi de dommages considérables. En effet, la *Figure 3.36*, montre que le module est en parfait état, la cellule du milieu ne présentant aucun signe de traitement abusif. Cependant, les mesures de tension effectuées après l'essai (Cf. *Tableau 3.15*) montrent que la tension de la cellule surchargée est nulle.

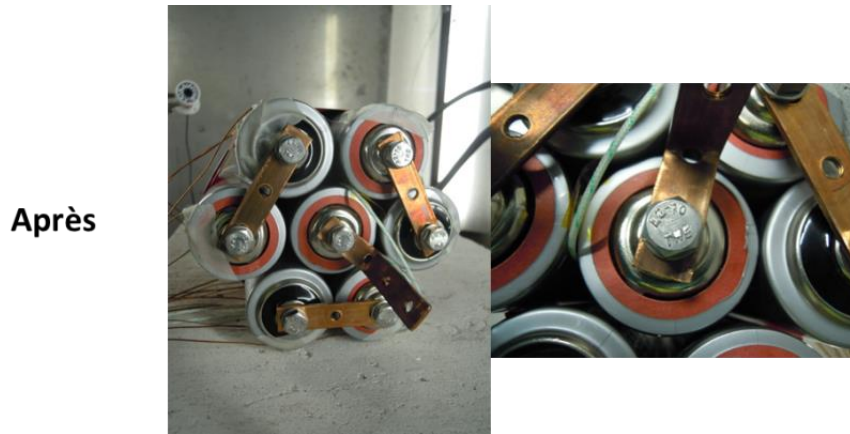


Figure 3.35. Clichés photographiques après l'essai de surcharge du module LifeBatt

Tableau 3.15 : Tension des cellules voisines avant et après l'essai de surcharge du module LifeBatt

Cellules	Tension (V) avant essai	Tension (V) après essai
1	3,33	3,33
2	3,33	3,33
3	3,33	3,33
4	3,33	3,33
5	3,33	3,33
6	3,33	3,33
7	3,333	0.313

La *Figure 3.36* présente l'évolution des températures des sept cellules constituant le module LifeBatt. Sur le graphe de la cellule n°7 surchargée, on constate que celle-ci a atteint seulement 40°C avant de subir une chute de température qui semble être provoquée par une légère ouverture l'évent. Pour les cellules voisines, l'augmentation de température n'a pas excédé 5°C. En conclusion, la cellule LifeBatt n'a pas montré une forte réactivité et son système d'évent semble bien fonctionner pour la protéger des surcharges.

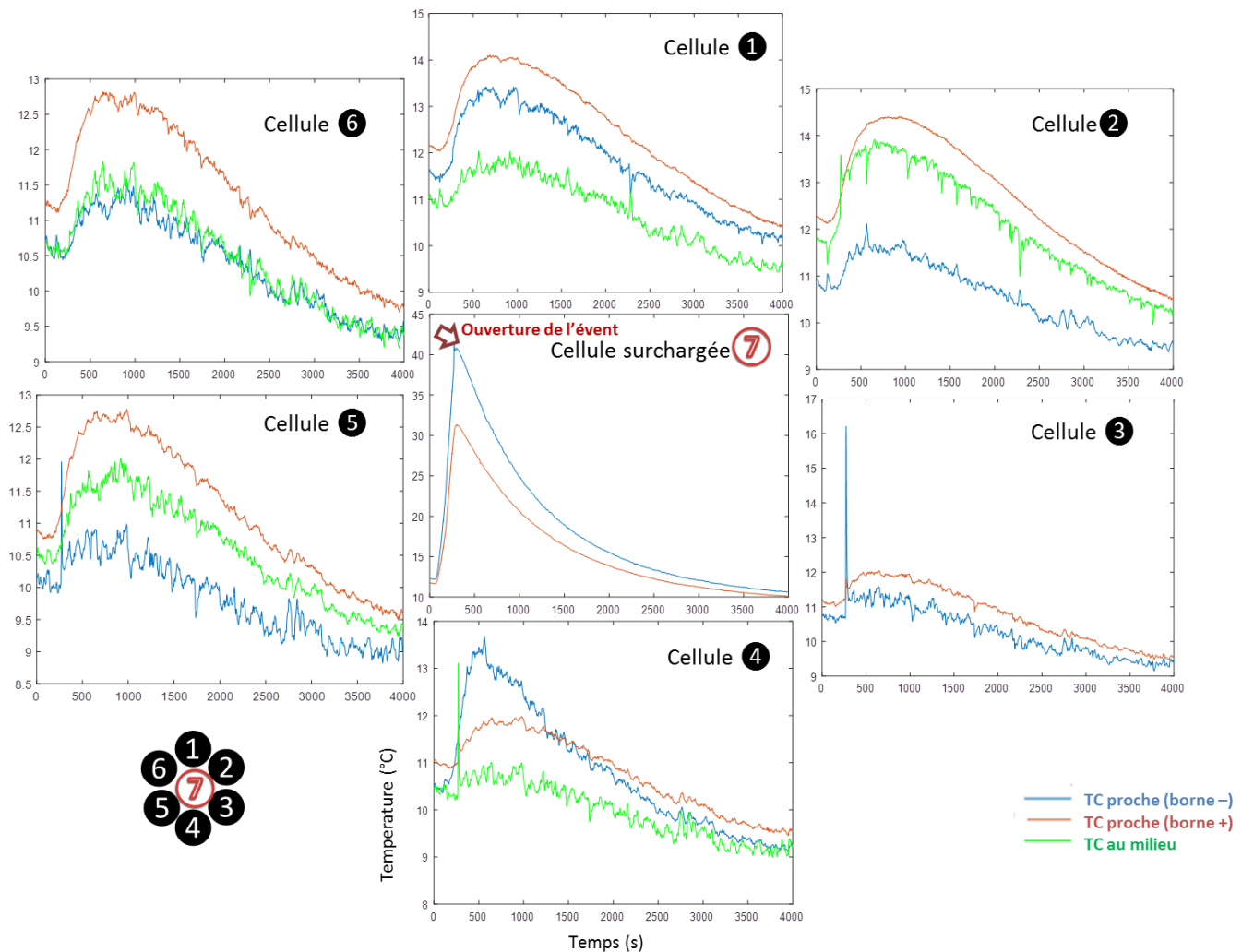


Figure 3.36. Evolution des températures des cellules au sein du module LifeBatt lors de l'essai de surcharge

5.3 Essai de surcharge sur un module PurePower

Etant donné que la cellule PurePower a montré une très forte réactivité dans les essais à l'échelle de la cellule, la surcharge appliquée sur la cellule du milieu (n°2) a été limitée à 2C, soit 60 A, sans limite de tension. Comme pour les modules A123s et LifeBatt constitués de cellules cylindriques, l'objectif est ici d'étudier le comportement des cellules prismatiques constituant le module et d'observer une propagation éventuelle de l'emballement thermique de la cellule n°2 à ses voisines (cellules n°1 et 3).

Dans l'enregistrement vidéo de l'essai, on a noté d'abord un gonflement très important de la cellule surchargée, puis une ouverture au niveau des soudures de part et d'autre du module, et enfin un dégagement de fumées suivi aussitôt d'un feu très impressionnant qui a duré 9 minutes. Après l'essai, le module était dans un état carbonisé, comme l'illustre la *Figure 3.37*.

L'évolution des températures des trois cellules constituant le module PurePower est présentée dans la *Figure 38*. Avant le départ du feu (représenté par le point rouge) la température de la cellule n°2 a atteint 86°C. Le feu s'est déclenché après 1830 s d'essai et les valeurs maximales des températures atteintes par les 3 cellules ont été très élevées. Il faut noter que l'enregistrement de la température au niveau de la cellule n°3 présente un bruit important qui peut être lié au déplacement des thermocouples provoqué par le gonflement de la cellule n°2 qui se trouvait au-dessus d'elle.



Figure 3.37. Clichés photographiques avant et après l'essai de surcharge du module PurePower

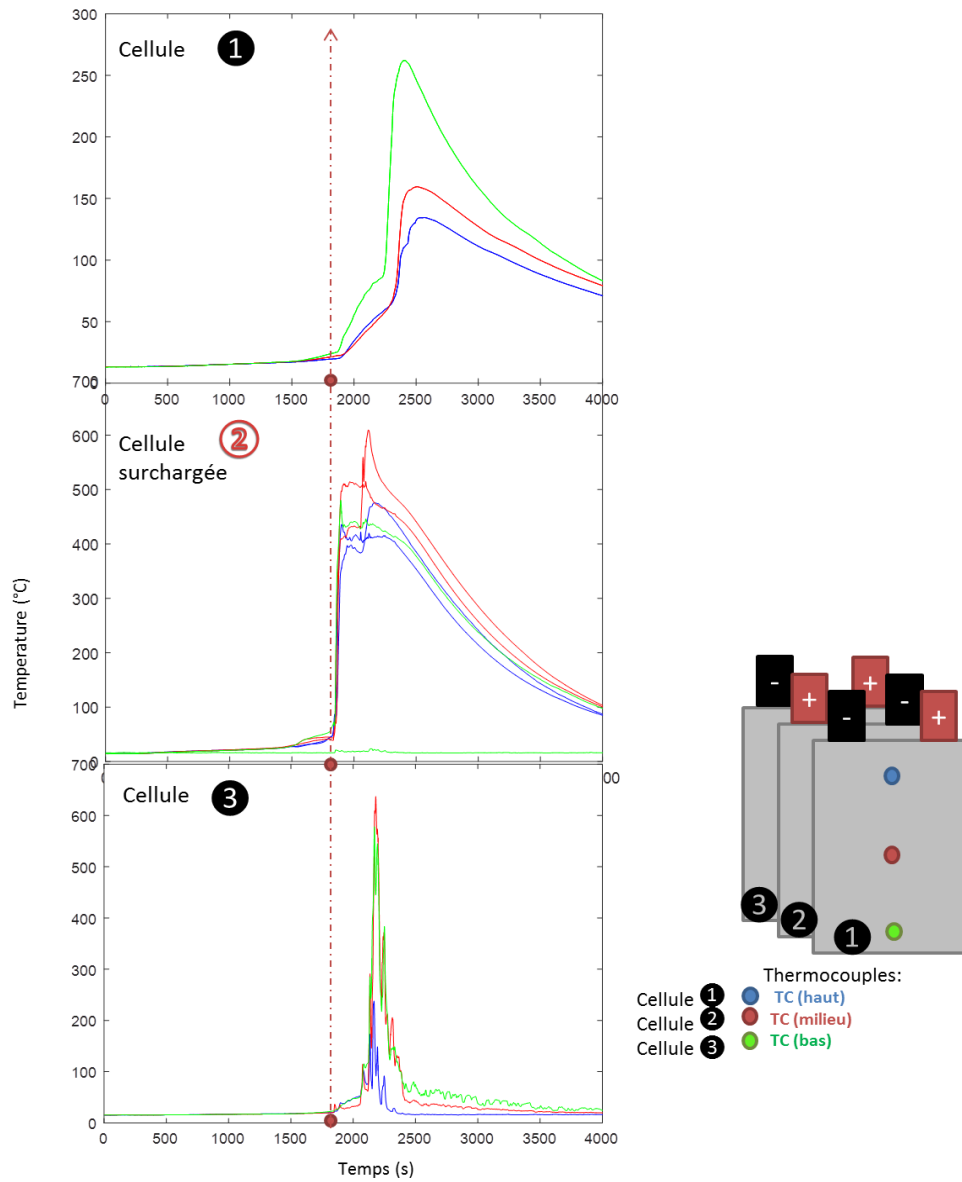


Figure 3.38. Evolution des températures des cellules au sein du module PurePower lors de l'essai de surcharge

5.4 Essai de surchauffe sur un module LifeBatt

Le module LifeBatt testé lors de cet essai de surchauffe a été construit de la même façon que celui utilisé pour l'essai de surcharge, à savoir qu'il est constitué de 7 cellules connectées en série. Un élément chauffant (densité de puissance de $0,78 \text{ W/cm}^2$) est cette fois-ci utilisé comme source d'activation de l'emballement. L'objectif étant de provoquer la propagation de l'emballement aux autres cellules, l'élément chauffant ne doit pas être en contact avec les cellules voisines pour assurer que la propagation de l'emballement soit uniquement due au transfert de la chaleur dégagée par la cellule chauffée. Dans notre essai, l'élément chauffant a été collé sur la cellule n°1 en périphérie du module, comme indiqué dans la *Figure 3.40*. Au total, vingt et un thermocouples ont été positionnés sur l'ensemble des cellules afin de suivre en continu l'évolution de leurs températures durant l'essai. Ces thermocouples sont installés de la manière suivante : 3 thermocouples par cellule non-chauffée (1 à proximité de la borne négative, 1 à proximité de la borne positive, et 1 au milieu de la cellule), 2 thermocouples sont installés sur la cellule chauffée (1 à proximité de la borne négative, et 1 à proximité de la borne positive). Le dernier thermocouple mesure la température de l'air ambiant. Durant l'essai un enregistrement vidéo a été effectué pour suivre le comportement des cellules et arrêter un départ de feu éventuel.

Les clichés photographiques pris avant et après l'essai (Cf. *Figure 3.40*) montrent que le module a gardé son intégrité mécanique. Seule la cellule n°1 a subi des dommages, en particulier au niveau de la borne positive, où on voit clairement le décollement du cache et quelques traces de condensation de l'électrolyte. Ces premières remarques indiquent a priori que la propagation de l'emballement thermique n'a pas eu lieu lors de cet essai, ce que confirme le *Tableau 3.16* où seule la cellule n°1 présente une tension nulle, la baisse de tension dans les autres cellules étant très limitée.

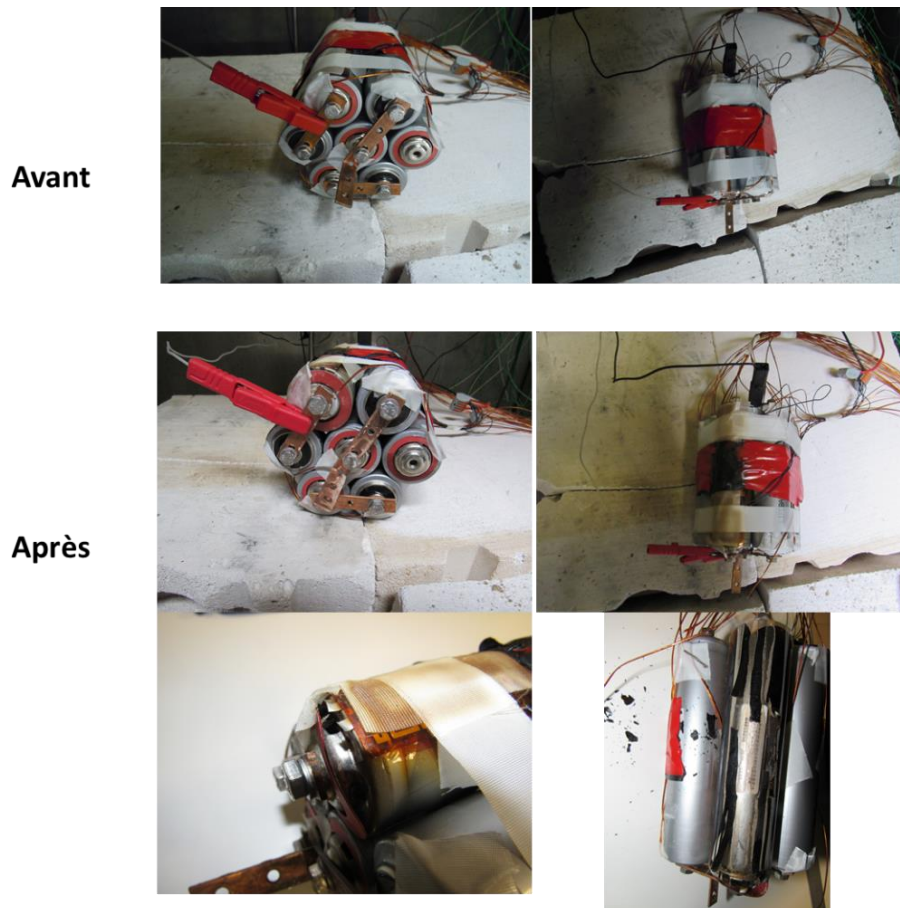


Figure 3.39. Clichés photographiques avant et après l'essai de surchauffe du module LifeBatt

Tableau 3.16 : Tension des cellules avant et après l'essai de surchauffe du module LifeBatt

Cellules	Tension (V) avant essai	Tension (V) après essai
1	3,33	0
2	3,33	3,324
3	3,33	2,990
4	3,33	3,281
5	3,33	3,330
6	3,33	3,328
7	3,33	3,337

L'évolution des températures enregistrées est présentée dans la *Figure 3.40*. Au bout de 2 heures de test, la température de la cellule chauffée (n°1) a atteint 100°C et s'est maintenue à cette valeur. Sachant que l'emballlement thermique se produit à une température plus élevée que 100°C, on a augmenté la consigne de chauffage en basculant après 4 heures l'alimentation de l'élément chauffant de 2,2 A, 26,5 V à 2,27 A, 27,8 V (la marge de l'augmentation de la puissance a été limitée par la température limite de fonctionnement de l'élément chauffant, fixée à 200°C par le constructeur). La température de la cellule n°1 a augmenté de 5°C, alors que celles des cellules voisines ont baissé de 10°C en moyenne. L'ouverture de l'événement s'est produite à 6h30min ; le gaz échappé a provoqué le décollement du thermocouple proche de la borne positive de la cellule n°1, ce qui s'est traduit par une baisse brutale de la température, observable sur le graphe de cette cellule dans la *Figure 3.40*. Dans la vidéo enregistrée, on a pu voir après l'ouverture de l'événement une petite flamme au niveau de la borne positive de la cellule n°1 mais sans départ de feu important. On peut donc conclure que le protocole appliqué lors de l'essai de surchauffe de la cellule LifeBatt n'a pas abouti à un emballlement thermique accéléré du module.

De nouveaux essais sont nécessaires pour mettre au point un protocole expérimental permettant de provoquer systématiquement l'emballlement thermique d'une cellule et sa propagation aux cellules voisines du module.

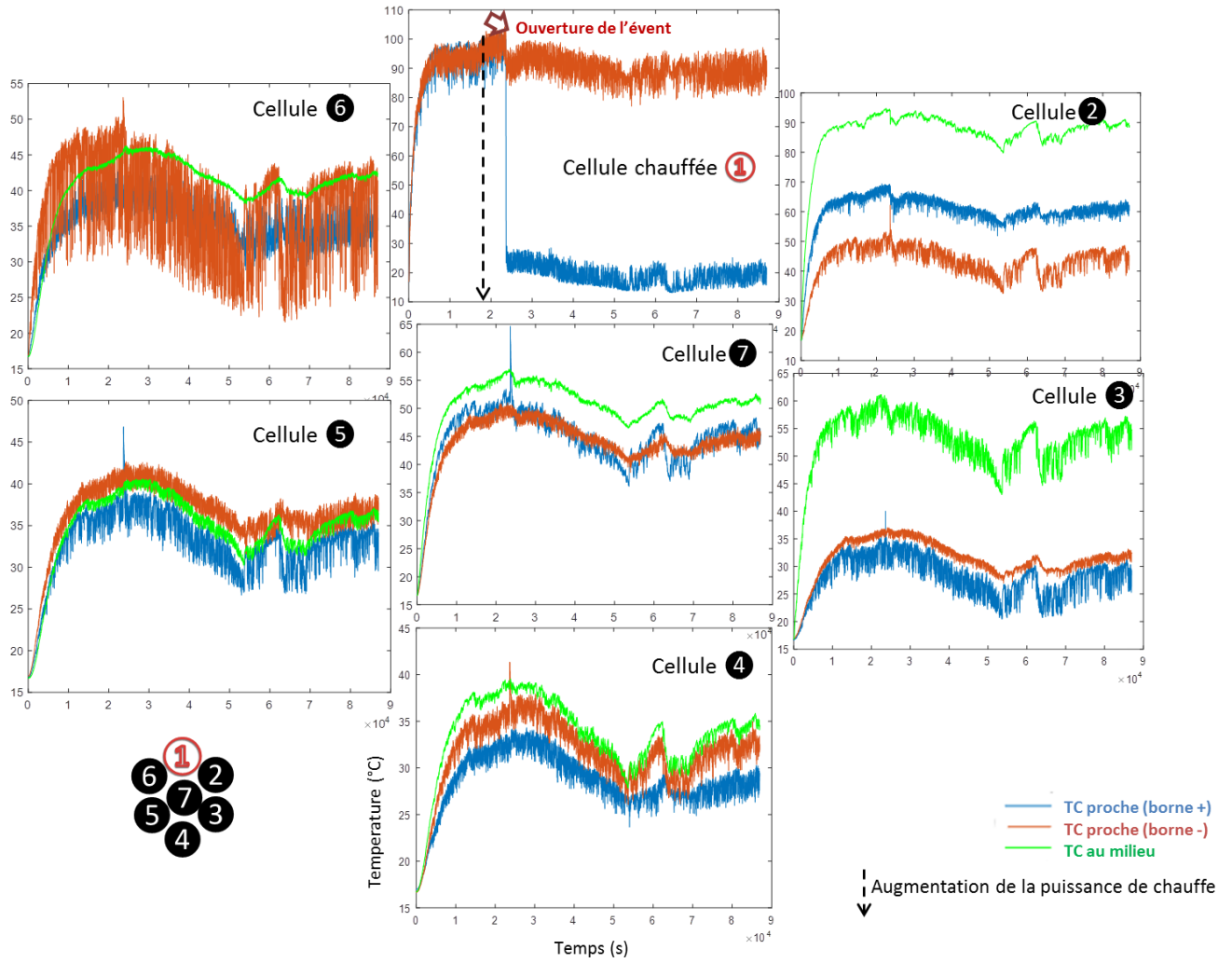


Figure 3.40. Evolution des températures des cellules au sein du module LifeBatt lors de l'essai de surchauffe

6 Conclusion

L'analyse des résultats issus de nos travaux expérimentaux a permis de mieux comprendre le phénomène de l'emballement thermique, en particulier pour la chimie LFP/C. En effet, à partir des essais réalisés dans le BTC, le diagramme du processus de l'emballement thermique pour les deux technologies A123s et LifeBatt de chimie LFP/C a été établi. Bien que cette chimie soit connue pour son aspect sécuritaire, un emballement thermique a clairement été observé pour l'ensemble des cellules testées dans des conditions thermiques abusives. Cependant, la sensibilité des réactions exothermiques intrinsèques n'a pas permis une meilleure reproductibilité des essais dans le BTC. Par ailleurs, la réactivité très importante des cellules PurePower a mis un frein à l'étude de l'emballement thermique pour la chimie NMC/C. En effet, peu d'essais ont pu être conduits jusqu'à la fin du test abusif dans le BTC sans provoquer l'arrêt ou des dommages au niveau du BTC.

Les différents essais abusifs réalisés dans le BTC et dans l'étuve montrent que le design cylindrique rigide des cellules LifeBatt et A123s est plus résistant que le design en sachet souple des cellules PurePower. La présence de l'évent dans le cas des cellules cylindriques permet aux gaz de s'échapper, ce qui baisse la pression au sein de la cellule et évite leur gonflement, contrairement aux cellules PurePower qui ne disposent d'aucun évent.

L'étude de l'influence du vieillissement calendaire sur la stabilité thermique des cellules a montré que le 1^{er} auto-échauffement des cellules A123s et LifeBatt vieilles se produit à une température plus élevée que pour les cellules neuves. Par contre, pour les cellules vieilles, le phénomène de l'emballement thermique est accéléré et se produit à une température plus faible. Ces résultats sont d'autant plus marqués que le niveau de vieillissement est élevé. Ces conclusions n'ont pas pu être validées pour la technologie PurePower, notamment en raison de la réactivité très importante de ces cellules qui provoque des dysfonctionnements au sein du BTC lors des essais. L'influence du vieillissement sur ces cellules de chimie NMC/C n'a pas pu être clairement établie en raison de la très grande variabilité dans la qualité de fabrication relevée sur ces cellules au cours de l'étude expérimentale.

Les essais abusifs réalisés dans le BTC ont ainsi permis de dresser une base de données nécessaire pour la calibration du modèle de l'emballement thermique, les résultats des essais dans l'étuve servant à valider le modèle.

Notons enfin que pour l'étude de l'emballement thermique à l'échelle du module, davantage d'essais sont nécessaires afin de mettre au point un protocole expérimental permettant de provoquer un emballement d'une des cellules du module et d'engendrer sa propagation à ses voisines.

7 Références du chapitre 3

- [CHE93] Y. Chen, J. W. Evans, Heat transfer phenomena in lithium/polymer-electrolyte batteries for electric vehicle application, *Journal of the Electrochemical Society* 140 (1993) 1833–1838.
- [COM16] P. T. Coman, S. Rayman, R. E. White, A lumped model of venting during thermal runaway in a cylindrical Lithium Cobalt Oxide lithium-ion cell, *Journal of Power Sources* 307 (2016) 56–62.
- [DEL13] A. Delaille, S. Grolleau, F. Duclaud, J. Bernard, R. Revel, S. Pélissier, E. Redondo-Iglesias, J.-M. Vinassa, A. Eddahech, C. Forgez, M. Kassem, S. Joly, D. Porcellato, P. Gyan, S. Bourlot, M. Ouattara-Brigaudet, Simcal project: calendar aging results obtained on a panel of 6 commercial Li-ion cells, *Meeting Abstracts MA2013-02* (2013) 1191.
- [KIM07] G.-H. Kim, A. Pesaran, R. Spotnitz, A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells, *J. Power Sources* 170 (2007) 476–489.
- [PEN16] P. Peng, F. Jiang, Thermal safety of lithium-ion batteries with various cathode materials, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 103 (2016) 1008–1016.
- [PRA13] E. Prada, D. Di Domenico, Y. Creff, J. Bernard, V. Sauvant-Moynot, F. Huet, A simplified electrochemical and thermal aging model of LiFePO₄-graphite Li-ion batteries: power and capacity fade simulations, *Journal of the Electrochemical Society* 160 (2013) A616-A628.