LABORATOIRE CENTRAL
39 bis, rue de Dantzig - 75015 PARIS
Tél : 01 55 76 24 15
Mél : pp-labcent@interieur.gouv.fr - Site internet : www.lcpp.fr
PÔLE DES MESURES PHYSIQUES ET SCIENCES DE L'INCENDIE
Section Ingénierie du Feu

CONFIDENTIEL

RAPPORT D'ESSAI SUR SITE n°13/11747

Évaluation du comportement de la trappe thermo-fusible sur la propagation d'effluents gazeux dans l'habitacle d'un véhicule de type ZOE (RENAULT) en cas d'emballement thermique de sa batterie de traction

réalisée le 3 octobre 2013

au centre de formation des cadres de la BSPP

Fort de la Briche, Saint-Denis (93)

Rédigé le 01/02/2014 **par:**	**Validé le** **par:**	**Approuvé le** **par:**
Nicolas DREUILLE Mathieu SUZANNE	Le chef du pôle MPI Patrick PINEAU	Le chef de section MPIIDF Hervé BAZIN

Ce document est la propriété intellectuelle du Laboratoire central de la Préfecture de Police. Il peut être utilisé, reproduit, à la condition que les informations ne soient pas altérées, que leur sens ne soit pas dénaturé et que leurs sources et la date de leur dernière mise à jour soient mentionnées.

Sommaire

1 Introduction 3

2 Objet 3

3 La trappe thermo-fusible 4

4 Site et dispositif expérimental 4

5 Protocole d'essai 4

6 Installation des matériels et du poste de mesure 5

6.1 Vidéos 5

6.2 Thermocouples (TCP) 6

6.3 Mesure de gaz 10

6.4 Tension 10

6.5 Thermobarohygromètre 11

7 Scénario d'essai 11

8 Déroulement de l'essai et résultats 12

8.1 Conditions initiales 12

8.2 Déroulement de l'essai 12

9 Conclusions 22

10 Annexe vidéo 24

1 Introduction

Le LCPP et la BSPP unissent leurs compétences, à travers une convention, pour apporter des réponses au comportement au feu de nouvelles technologies.

Le développement du parc automobile à énergie électrique, et en particulier l'usage des batteries de nouvelle génération à base de lithium (lithium-ion, lithium métal polymère...), nécessite de la part des services de secours une adaptation des procédures d'intervention. Par ailleurs, il devient opportun de procéder à l'évaluation des risques supplémentaires pour les passagers présents dans l'habitacle suite à un accident provoquant un emballement thermique de la batterie. Il est également important d'estimer le temps dont les secours bénéficient pour mettre les passagers en sécurité une fois que les premiers signes d'emballement thermique apparaissent.

Le constructeur RENAULT, suite aux essais réalisés précédemment[1], a équipé ses véhicules électriques d'une trappe thermo-fusible (fireman access) afin de donner aux sapeurs-pompiers une possibilité d'extinction en cas d'incendie de la batterie de traction. L'intégration de cette trappe amène certaines questions portant notamment sur son comportement et l'incidence qu'elle peut avoir sur les passagers lors d'un accident avec emballement thermique de la batterie.

Ainsi, RENAULT a fourni deux véhicules à traction électrique (avec et sans trappe thermo-fusible) pour effectuer des tests sur le terrain d'entraînement du Centre de Formation des Cadres (CFC) du Fort de la Briche à Saint-Denis (93).

Les essais réalisés n'ont aucun caractère normatif et ne sauraient constituer une base pour un quelconque futur essai normatif.

2 Objet

L'objet des essais était d'évaluer l'impact du comportement de la trappe thermo-fusible d'une Renault Zoé sur la propagation d'effluents gazeux dans l'habitacle du véhicule lorsqu'il y a un emballement thermique de la batterie dû à un dysfonctionnement interne.

Cet essai a permis de mettre en avant les risques que peuvent encourir les passagers de la voiture lors d'un accident en étant bloqué dans l'habitacle (portes fermées, passager inconscient...).

Illustration 1: vue de dessus de le Renault ZOE (image: site internet Renault)

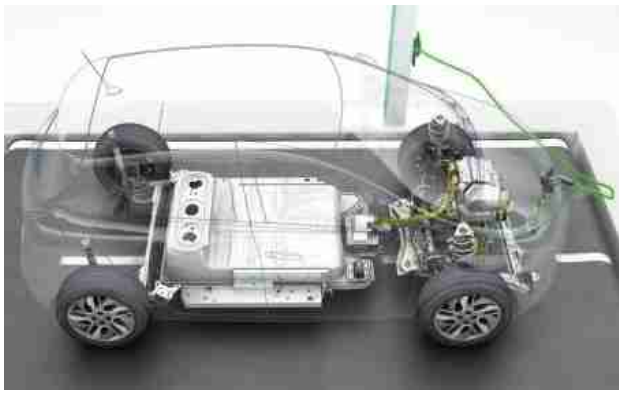


Illustration 2: vue du bloc batterie

1 RG 12/815, ***Étude de l'impact de feux de véhicules électriques (RENAULT) sur les intervenants des services de secours.***

Ce document est destiné à décrire le dispositif expérimental, les moyens de mesure mis en œuvre, les essais et exposer les résultats obtenus.

3 La trappe thermo-fusible

Afin de pallier aux problèmes d'extinction des batteries de traction d'un véhicule électrique, RENAULT a équipé certaines de ses voitures d'une trappe thermo-fusible. Cette dernière permet aux sapeurs-pompiers d'interrompre par noyage un feu de batterie survenant suite à un emballement thermique.

La trappe, placée sur le dessus du pack batterie sous la banquette arrière, fond lorsque la température dans son environnement proche est supérieure à 150°C.

Illustration 3: Trappe thermo-fusible du pack batterie (placé sous la banquette arrière)

4 Site et dispositif expérimental

Le site d'essai est situé au Fort de la Briche, Saint-Denis (93). Il s'agit du centre de formation des cadres de la BSPP.

Le dispositif expérimental est limité à l'aire de manœuvre des sapeurs-pompiers située à l'avant d'un caisson d'entraînement feu.

5 Protocole d'essai

Un protocole d'essai a été préalablement rédigé afin de :

- définir les processus et mesures à réaliser ;
- répertorier les matériels nécessaires ;
- répartir les missions des personnels du LCPP impliqués ;
- décrire les séquences de l'essai.

Les modifications qui se sont révélées nécessaires sur site ont fait l'objet d'une mise à jour du protocole expérimental.

6 Installation des matériels et du poste de mesure

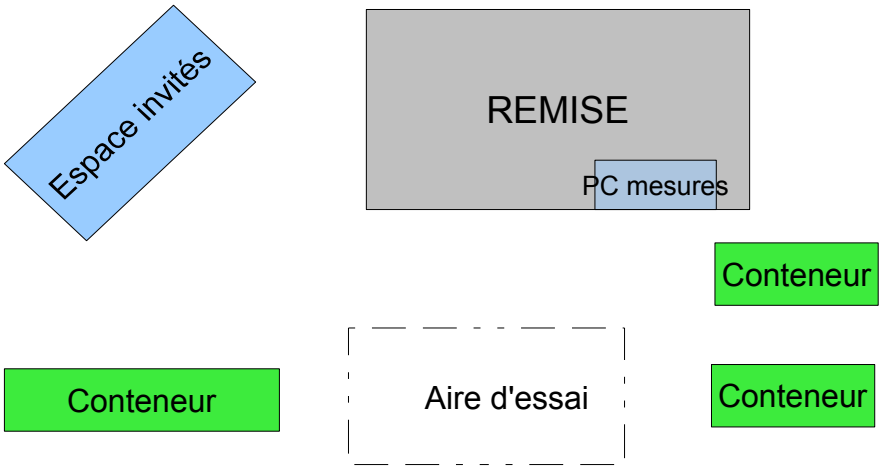


Illustration 4: Plan schématique du site

Le poste central des mesures (PC) et les matériels d'acquisition et d'enregistrement ont été installés dans la remise contiguë à l'aire d'essai. Cette implantation permet notamment un raccordement des équipements au réseau de distribution électrique.

6.1 Vidéos

6.1.1 Caméras intérieures

Deux caméras (webcam) ont été placées dans l'habitacle du véhicule électrique. Une des webcams a enregistré une vue d'ambiance de l'habitacle (CAM_INT_1) et l'autre caméra (CAM_INT_2) une vue directe sur le dessous de la banquette arrière au droit de la trappe thermo-fusible.

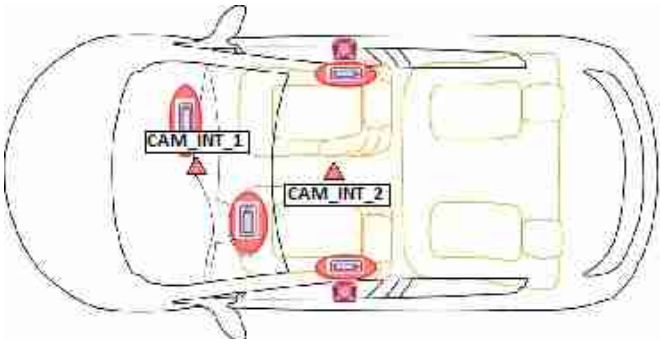


Illustration 5: Implantation des caméras (webcam) dans l'habitacle

CAMÉRAS INTÉRIEURES	PLACEMENT
CAM_INT_1	Sur le tableau de bord. Filme l'habitacle sur un champ large.
CAM_INT_2	Sur le plancher, filme le dessous de la banquette arrière (trappe).

6.1.2 Caméras Extérieures

Trois caméras CCD ont été également placées à l'extérieur du véhicule électrique pour visualiser les événements :

La CCD 1 (V_TRAPPE) a eu une vue directe (si possible) depuis l'extérieur sur la banquette arrière vers la trappe thermo-fusible. Il a été veillé à reculer la caméra au moment de l'extinction. Elle a ensuite été positionnée dans la mesure du possible pour filmer l'extinction.

La CCD 2 (V_PACK) a eu une vue sur le dessous du véhicule et plus particulièrement du pack batterie.

La CCD 3 (V_GEN) a enregistré une vue d'ensemble du véhicule et du dispositif expérimental.

Les caméras CCD ont été installées côté remise du site expérimental.

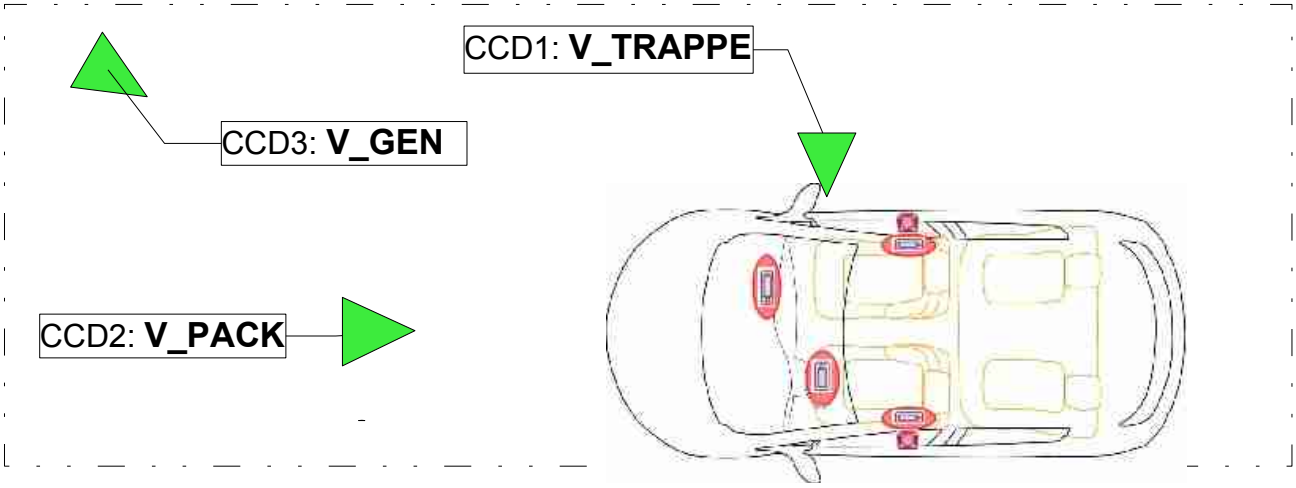


Illustration 6: Implantation des caméras CCD à l'extérieur du véhicule sur l'aire d'essai

CAMERAS EXTÉRIEURES	PLACEMENT
V_TRAPPE	Sur trépied contre le véhicule. Filmait la trappe ou le bas de la banquette arrière en direction de la trappe.
V_PACK	Au sol sur la plate forme bétonnée. Filmait le dessous du pack batterie du véhicule.
V_GEN	Sur trépied. Enregistrait une vue générale de l'incendie.

6.2 Thermocouples (TCP)

- Huit thermocouples ont été implantés dans l'habitacle du véhicule électrique par le LCPP.

- Treize thermocouples ont été implantés par RENAULT au niveau du pack : huit thermocouples répartis sur le pourtour de la batterie et cinq thermocouples pour une mesure de la température interne de la batterie.

Les thermocouples installés étaient de type K, gainés en Inconel® et d'un diamètre de 1,5 mm (LCPP) ou 1 mm (RENAULT). Ils ne sont représentatifs que des températures relevées aux points de mesure, c'est-à-dire dans l'environnement proche de l'organe visé.

L'acquisition de l'ensemble des mesures de température a réalisée par le LCPP.

Les thermocouples ont été implantés de la façon suivante :

- **LCPP**

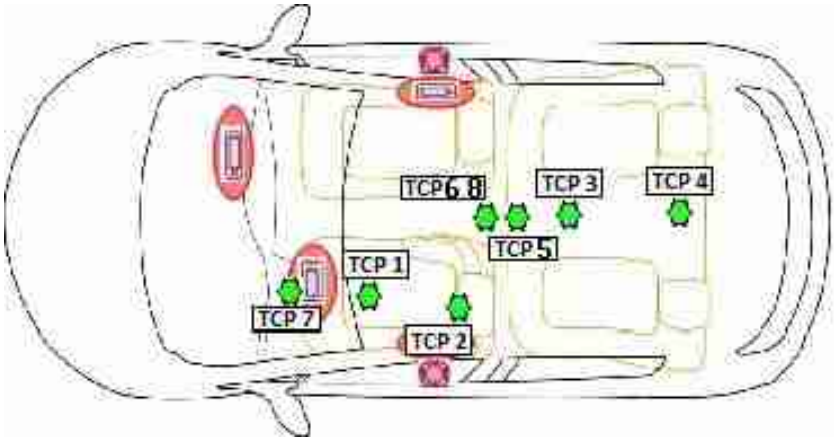


Illustration 7: Implantations des thermocouples dans l'habitacle

THERMOCOUPLES	PLACEMENTS
TCP1	Siège conducteur
TCP2	Repose-tête conducteur
TCP3	Siège passager arrière
TCP4	Repose-tête passager arrière
TCP5	Dans l'interstice entre la trappe thermo-fusible et l'assise de la banquette arrière
TCP6	Entre les deux reposes-têtes avant sur la canne de prélèvement gaz (température pour la mesure de gaz)
TCP7	Sur le plancher, devant le siège conducteur
TCP8	Sur le plancher, devant les sièges passagers arrière

- **RENAULT**

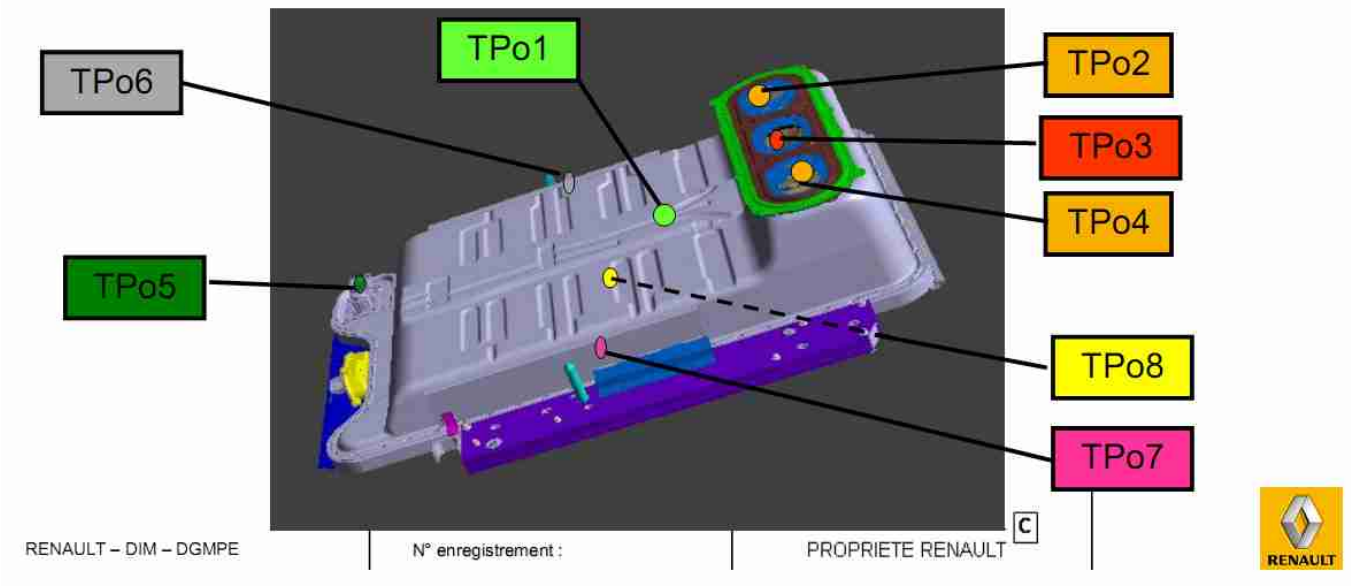


Illustration 8: Implantations des thermocouples sur le pourtour de la batterie

THERMOCOUPLES	PLACEMENTS
TPo1	Sur le dessus du carter sup
TPo2	1 TC au centre de chaque conduit HVAC
TPo3	
TPo4	
TPo5	Sur le SD/SW
TPo6	1 TC sur chaque face latérale
TPo7	
TPo8	Sous la face inférieure

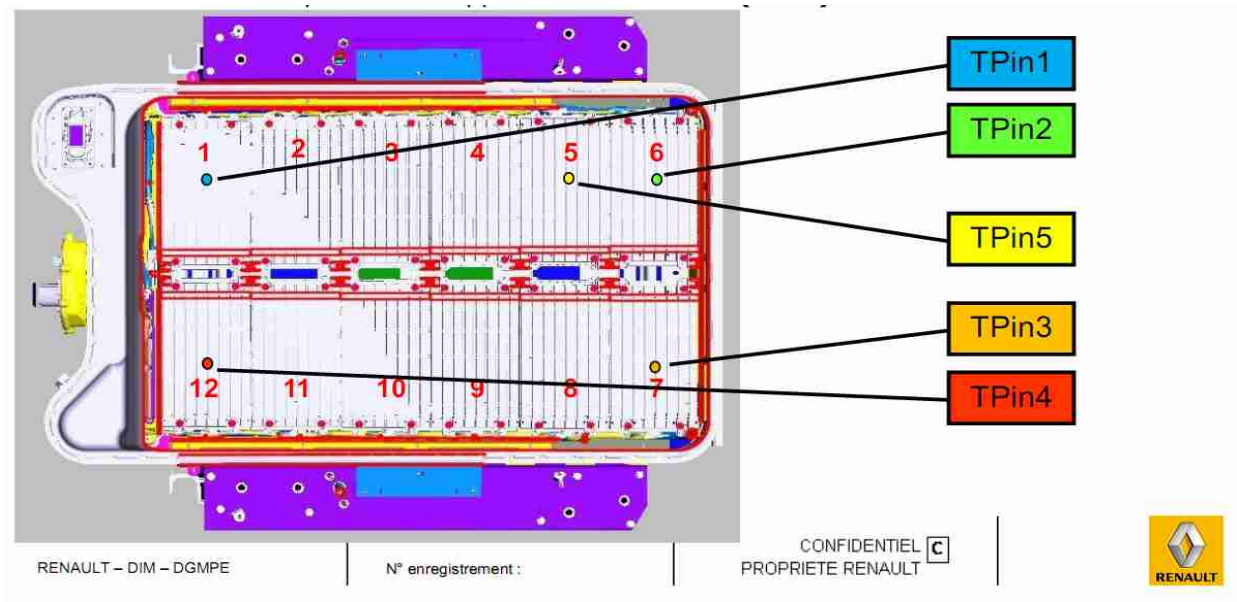


Illustration 9: Implantations des thermocouples (Températures interne batterie)

THERMOCOUPLES	PLACEMENTS
TPin1-MOD1	1 TC interne galerie de refroidissement modules 1,6,7 et 12
TPin2-MOD6	
TPin3-MOD7	
TPin4-MOD12	
TPin5-MOD5	Sur la bi-cellule générant l'incident thermique

THERMOCOUPLES	PLACEMENTS
TPv1	**Pas installé pour des raisons techniques**
TPv2	Sur la trappe thermo-fusible

6.3 Mesure de gaz

Un point de prélèvement a été mis en place dans l'habitacle afin de suivre en continu la concentration en O_2, CO_2 et CO à l'aide d'un analyseur multi-gaz dont les sorties analogiques ont été raccordées à l'acquisition des mesures de température.

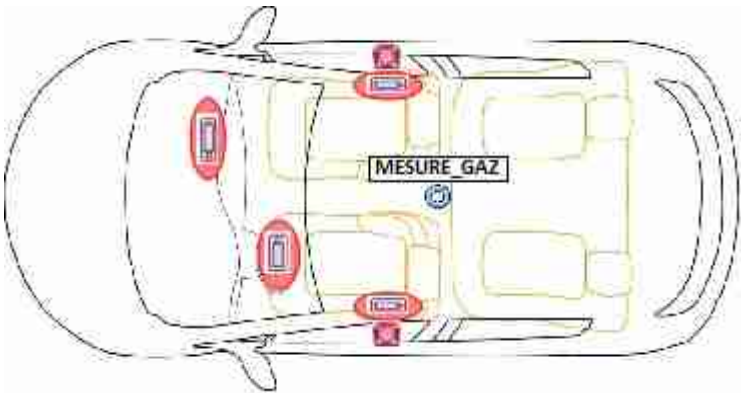


Illustration 10: Implantation de la canne pour la mesure de gaz dans l'habitacle

MESURE DE GAZ	PLACEMENT
GAZ	Entre les deux reposes-têtes avant (température pour la mesure de gaz)

Une canne en inox de 6 mm de diamètre dotée d'un filtre frité au point de prélèvement a été installée dans l'habitacle via un trou réalisé pour passer la canne par la toiture du véhicule.

6.4 Tension

Une mesure de tension aux bornes des 2 packs composant la batterie a été effectuée, soit 2 mesures de 200 volts.

La mesure a été prise entre le SD/SW et le fusible inter-stack.

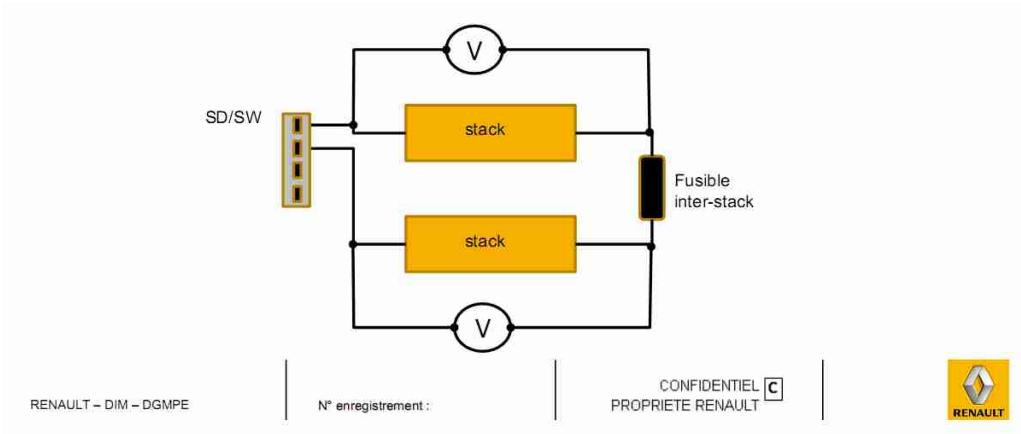


Illustration 11: Mesure de tension en 2 zones.

L'enregistrement des deux mesures de tension a été effectué par le LCPP au moyen de deux voltmètres dont les sorties ont été raccordées aux voies analogiques du boîtier maître utilisé pour l'acquisition des mesures de température.

6.5 Thermobarohygromètre

Le thermobarohygromètre utilisé pour le relevé des conditions initiales et finales d'essai a été placé entre l'aire d'essai et la remise puis dans l'habitacle du véhicule testé.

7 Scénario d'essai

Lors de la genèse du projet, l'évaluation de l'incidence de la trappe thermo-fusible devait se faire en deux phases avec : un premier essai impliquant un véhicule comportant une trappe thermo-fusible et un second avec un véhicule sans trappe thermo-fusible, suivi d'une comparaison des résultats.

Le véhicule instrumenté, portes et fenêtres fermées, a été placé sur l'aire d'essai :

Le départ de feu a consisté à un emballement thermique de la batterie provoqué par une surcharge d'une cellule du pack. La surcharge a été réalisée par RENAULT.

Une fois la batterie emballée, le comportement dans l'habitacle a été observé via les caméras et les différentes mesures de gaz et de températures réalisées en continue comme cela a été décrit dans les paragraphes précédents du présent protocole.

Des critères de tenabilité sont rappelés dans le tableau[2] suivant :

CONDITIONS	VALEURS	EFFETS
Concentration O_2	15 %	Trouble du jugement et de l'attention Épisode d'apnée Fatigabilité; perte du contrôle de la motricité
	12,00%	**Perte de conscience** **Lésions cérébrales irréversibles**
Concentration CO_2	**20 %**	**Narcose[3]**
Concentration CO	0,1% ou 1 000 ppm	Décès entre 1 et 3h
	1% ou 10 000 ppm	**Décès en 3 minutes**
Température des gaz en °C	150 °C	Incapacitation en 5 min
		Létalité en 30 min
	190 °C	**Incapacitation immédiate**
		Létalité en 15 min

L'essai est considéré comme terminé lorsque les conditions d'incapacitation rapide ou de syncope dans l'habitacle sont atteintes pour un ou plusieurs passagers, c'est à dire si l'un ou l'autre des critères mis en gras dans le tableau précédent est atteint au point de prélèvement des gaz.

2 Effet du feu sur les personnes – Éric Guillaume – LNE – Juillet 2006
3 Narcose : Sommeil provoqué artificiellement par une substance narcotique

8 Déroulement de l'essai et résultats

8.1 Conditions initiales

Les conditions initiales mesurées à l'intérieur du véhicule et sur l'aire de stationnement avant l'essai sont les suivantes :

	Habitacle Zoé		Aire d'essai		Appareil utilisé
	Lecture	Correction	Lecture	Correction	
Température (°C)	15,0	14,8	14,8	14,6	LCPP0109
Humidité (%)	89,0	87,0	84,0	82,0	
Pression (hPa)	1011,3	1012,1	1011,3	1012,1	

8.2 Déroulement de l'essai

L'essai sur le Véhicule Renault Zoé 1 s'est déroulé en trois phases :

Une **première phase** de mise en surcharge de la batterie, pour provoquer la surchauffe d'une cellule du module 5 jusqu'à l'emballement thermique. Ce module est situé vers l'arrière, côté droit de la batterie.

Il est à rappeler que les systèmes de contrôle et de sécurité qui, lors d'une surcharge, auraient coupé la charge et ouvert les relais batterie pour son isolation, ont été inhibés.

Une **deuxième phase** lors de l'emballement thermique de la batterie du véhicule où il a été évalué l'impact de la trappe thermo-fusible sur la propagation des effluents du feu dans l'habitacle.

Après 40 minutes d'emballement thermique et au regard des mesures relevées, il est décidé d'abandonner l'essai prévu sur le second véhicule ne comportant pas de trappe thermo-fusible, et d'enflammer les gaz produits par la réaction d'emballement du premier véhicule afin de provoquer un feu du pack batterie.

Dans un premier temps, les portes de la voiture ont été ouvertes et l'assise de la banquette arrière enlevée afin de constater l'état de dégradation de la trappe thermo-fusible.

Une **troisième phase,** hors objectif initial de l'essai, où il est montré la rapidité de l'extinction d'un feu de batterie par noyage du pack batterie à partir de la trappe thermo-fusible ; le feu de batterie étant provoqué par l'inflammation des gaz de la phase précédemment décrite.

8.2.1 Surcharge de la batterie

La cellule a commencé à être mise en surcharge vers 12 h 30 min.

L'acquisition des mesures thermiques, gaz, tension et vidéos a débuté environ une heure plus tard.

Après environ 2 heures de surcharge, il a été constaté un échauffement continu du module 5 du pack batterie ***(Tpin5-MOD5)*** jusqu'à ce que celui-ci atteigne une température d'environ 110°C. La température du module s'est ensuite stabilisée en raison d'un courant de surcharge limité ne permettant pas de provoquer l'emballement thermique de la cellule surchargée.

Il a donc été décidé de changer de source de courant afin de provoquer l'emballement thermique de cette cellule.

8.2.2 Emballement de la batterie

L'emballement thermique de la cellule du module 5 a lieu dès le branchement de la nouvelle source de courant à 15 h 20 min 56 s utilisée par Renault.

Au regard de l'objectif de cet essai qui est d'évaluer l'impact de la dégradation de la trappe thermo-fusible sur la propagation des effluents du feu dans l'habitacle du véhicule, le moment de l'emballement est considéré, comme l'instant t_0 du début de l'essai.

L'emballement de la cellule a entraîné une augmentation très rapide de la température du module 5 la contenant, celle-ci passant de 80 °C à 600 °C en moins de 30 secondes et atteignant un maximum d'environ 800 °C environ 3 min 30 s après l'emballement (voir ***Tpin5-MOD5*** sur le Graphique 1).

Après 10 minutes de réaction, la chaleur diffusée après l'emballement thermique du module 5 atteint le module 6 adjacent ***(Tpin2-MOD6)*** qui s'emballe à son tour après un peu moins de 18 min (1 070 s) d'essai. L'augmentation de température du module est très rapide mais celle-ci atteint un maximum de 600°C, environ 200°C inférieure à la température maximale mesurée sur le module 5.

La température au niveau du module 7 ***(Tpin3-MOD7)*** commence à augmenter en même temps que celle du module 6 mais de manière plus progressive. Lorsque la porte du véhicule est ouverte 47 minutes (environ 2800 s) après le début de l'essai, la température du module 7 est de l'ordre de 60°C, ne correspondant donc pas à une température d'emballement.

Les deux modules ***(Tpin1-MOD1*** et ***Tpin4-MOD12)*** situés à l'autre extrémité du pack batterie ne subissent pas d'augmentation de température majeure (environ 10°C) pendant toute la phase dite d'emballement thermique.

L'emballement thermique, comme le laisse supposer les mesures de température dans les différents modules (voir Graphique 1), n'a pas été généralisé à l'ensemble du pack batterie.

Ce fait est confirmé par les mesures des tensions tracées dans le Graphique 4.

La « propagation » de l'emballement au sein du pack batterie s'est faite de cellule en cellule avec un maximum de deux cellules en même temps, la chute de tension se faisant par paliers de 4 ou 8V ***(Tension_1)***.

La vitesse de perte de signal des cellules, et donc de propagation de l'emballement, diminue après ½ h d'essai, quand la température au niveau du module 6 commence à décroitre. En effet l'intervalle entre deux chutes de tension est plus important, sans pour autant cesser.

En confirmation des températures des modules 1 et 12, la mesure en continue d'une tension de 191 Volts ***(Tension_2)*** indique qu'il n'y a pas eu d'emballement des cellules des modules 7 à 12.

Le pack batterie (voir ***TPo1, TPo5, TPo6, TPo7 et TPo8*** sur le Graphique 2***)*** subit d'une manière générale une augmentation de température continue et de faible amplitude (températures comprises entre 60°C et 125°C). Seul le thermocouple situé au dessus du carter supérieur du pack et sous le plancher du véhicule (***TPo1***) mesure une température plus importante, de l'ordre de 250°C à la fin de cette phase d'essai, avec un changement de pente dans l'augmentation de la température après ½ h d'essai. Cette

rupture de pente peut être due à la conduction de la chaleur produite par l'emballement thermique des modules 4 et/ou 3.

Au niveau des conduits HVAC, il y a un échappement de gaz produits dès le début de l'emballement thermique de la cellule du module 5 (***TPo2, TPo3 et TPo4)***. La température des gaz est en constante augmentation jusqu'à atteindre une stabilisation au sein du module 6 (1800 s d'essai). La température des gaz, qui est comprise entre 260 et 270°C, se stabilise par la suite jusqu'à la phase d'inflammation. Il est à noter que le thermocouple TPo4 est détruit après 1560 s d'essai.

L'évolution des courbes de température des thermocouples situés au dessus de la trappe thermo-fusible (à l'extérieur du pack batterie) (***Tpv2)*** et dans l'espace vide entre la trappe thermo-fusible et l'assise de la banquette arrière (***TCP5)*** est relativement similaire passé les premières dizaines de secondes suivant l'emballement thermique (voir le Graphique 3). Les courbes présentent une différence d'environ 50°C, la température au niveau de la trappe étant supérieure. Toutefois, cette différence augmente lorsque la température au niveau trappe thermo-fusible (***TPv2)*** approche, atteint et dépasse les 150°C (1600 s d'essai), température supposée de fusion du matériau constituant cette trappe. Cela qui signifie que, lors de l'essai, cette dernière n'a pas totalement perdu ses propriétés mécaniques mais était cependant moins perméable qu'au début. Le chute de température au niveau de ces thermocouples (3200 s environ) intervient lorsque la banquette est enlevée avant l'inflammation des gaz.

Il n'y aucune variation de température dans l'habitacle pendant toute la durée de la première phase d'essai.

Les variations des concentrations en gaz sont relativement faibles : augmentations de 0,07 % en CO_2 et 0,02 % en CO et diminution de 0,7 % de l'O_2.

L'assise de la banquette arrière sous laquelle est positionnée la trappe thermo-fusible participe également à « l'étanchéité » dans le passage des gaz. En effet la température au niveau du ***TCP5***, supérieure à 200°C, indique qu'il y a un faible échange, du pack batterie vers l'habitacle, de gaz à température élevée à travers la trappe thermo-fusible. Cette température est toutefois insuffisante pour dégrader la mousse de la banquette.

Après 40 min d'essai, lorsqu'il est acquis que les conditions d'incapacitation rapide ou de syncope dans l'habitacle ne seront pas atteintes pour un ou plusieurs passagers, les gaz générés par l'emballement thermique de la batterie sont alors volontairement enflammés à l'aide d'une torche.

Avant l'inflammation des gaz, lorsqu'une porte arrière est ouverte et que la banquette et la trappe thermo-fusible sont retirées (3400s environ), l'habitacle commence à être envahi par des gaz à une température proche de 200°C (***TCP3*** et ***TCP4***).

8.2.3 Inflammation des gaz

L'inflammation des gaz ne modifie pas la réaction interne en cours au niveau de la batterie.

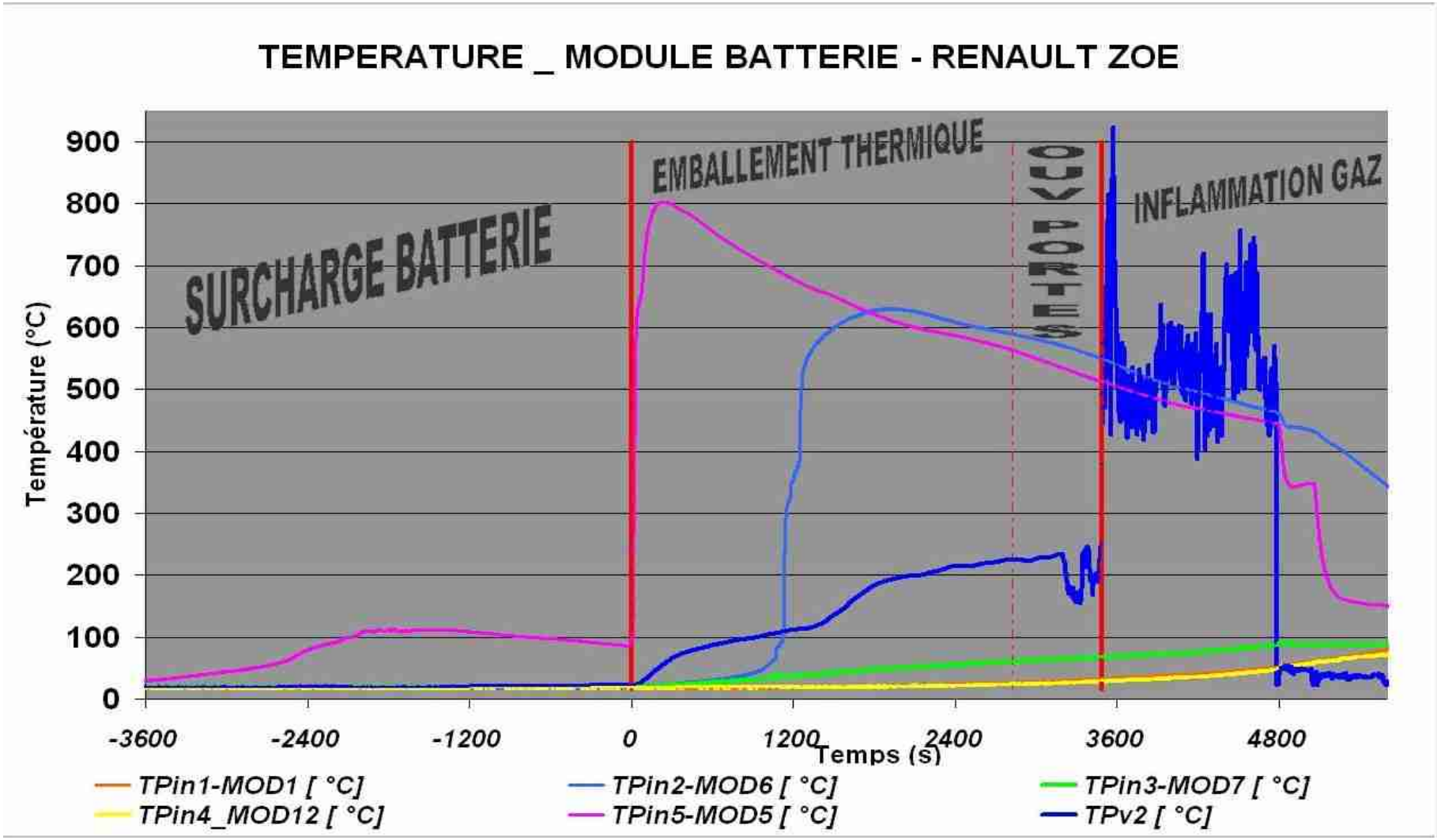
La perte de tension au niveau des bornes du pack batterie et la température interne des différents modules ne sont pas influencées par cette troisième phase d'essai. En effet, il n'y a pas de rupture de pente dans les mesures enregistrées.

L'inflammation des gaz a entraîné une augmentation importante de la température au niveau des conduits HVAC (***TPo2, TPo3 et TPo4)*** qui atteint 400°C. L'effet de l'incendie est plus modéré sur le pack batterie avec une augmentation plus limitée et plus tardive des températures.

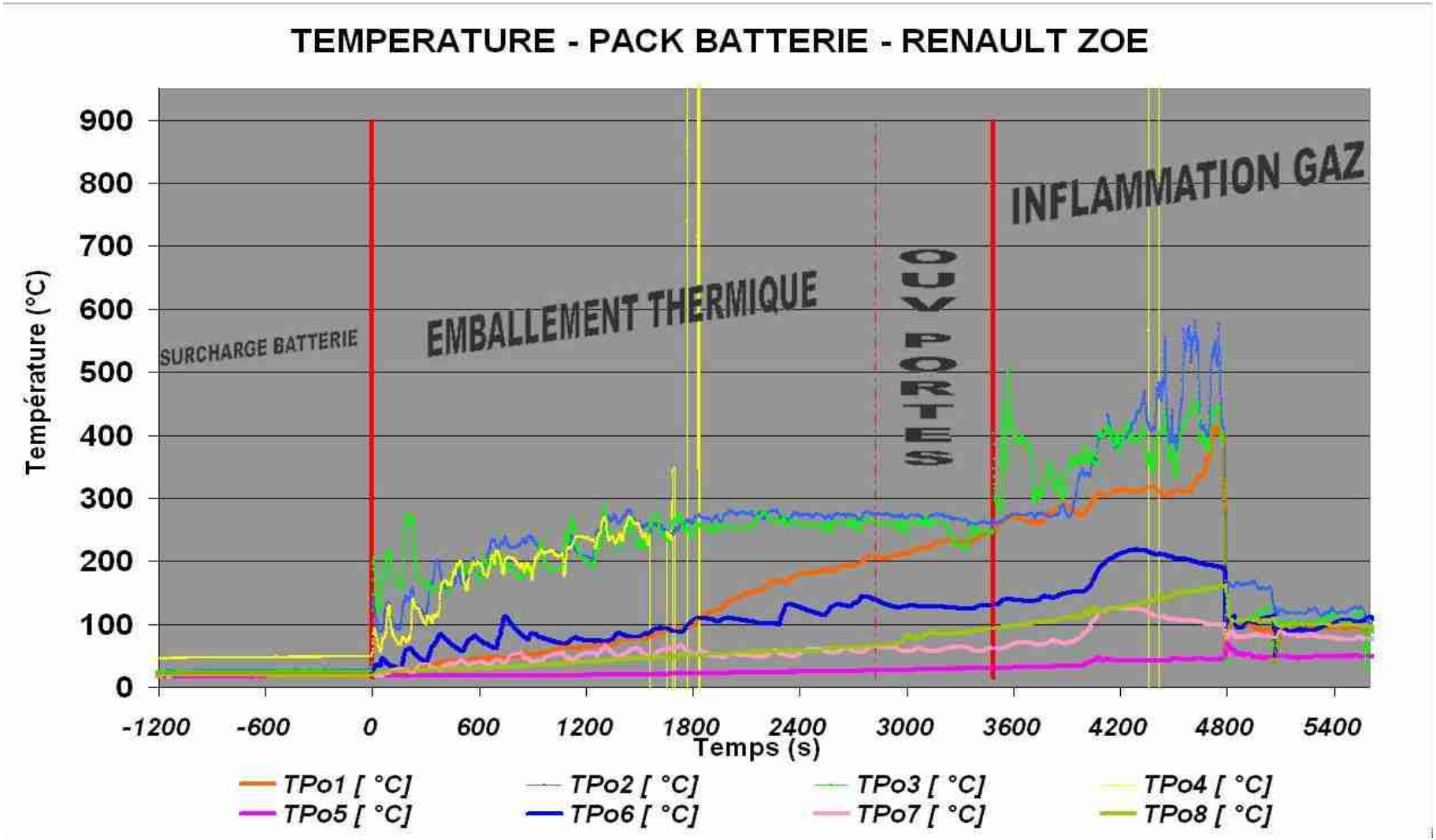
L'efficacité de l'extinction du pack batterie par noyage à partir de l'accès donné par la trappe thermo-fusible est visible à la fois par le refroidissement généralisé du pack ainsi que par la chute rapide, voire immédiate, des températures des modules 5 et 6 sièges de l'emballement thermique.

Concernant l'habitacle, les relevés de températures montrent qu'il s'agit d'une feu d'habitacle maîtrisé qui ne s'est pas généralisé à la totalité du véhicule.

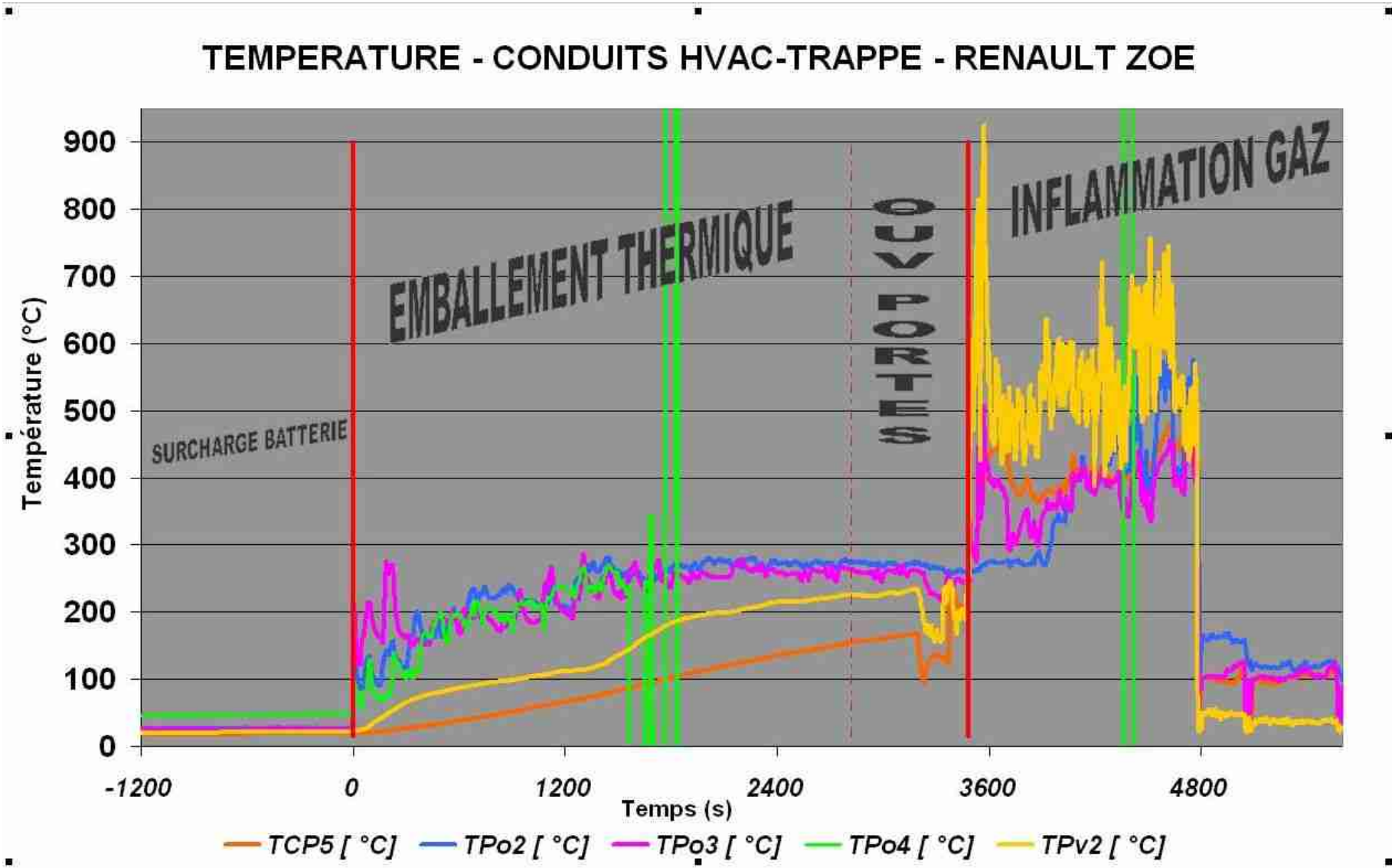
En raison des résultats de l'essai sur le véhicule comportant une trappe thermo-fusible exposés précédemment, il a été décidé d'un commun accord avec toutes les parties impliquées dans cette campagne d'essai, de ne pas procéder au second essai avec un véhicule sans trappe thermo-fusible. En effet, les conditions d'incapacitation rapide ou de syncope dans l'habitacle n'ont pas été atteintes pour un ou plusieurs passagers,



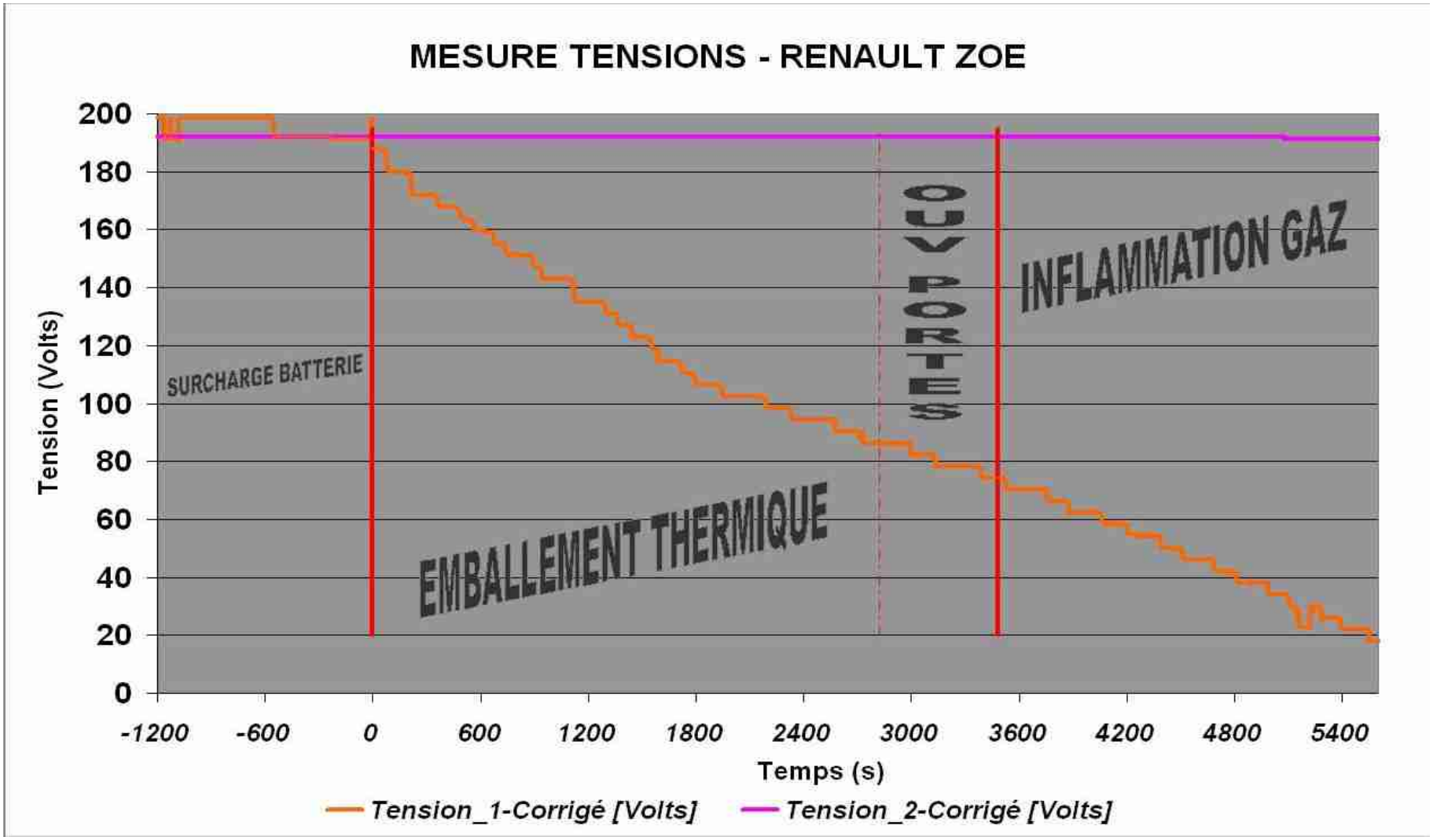
Graphique 1: Températures (°C) mesurées dans le pack batterie.



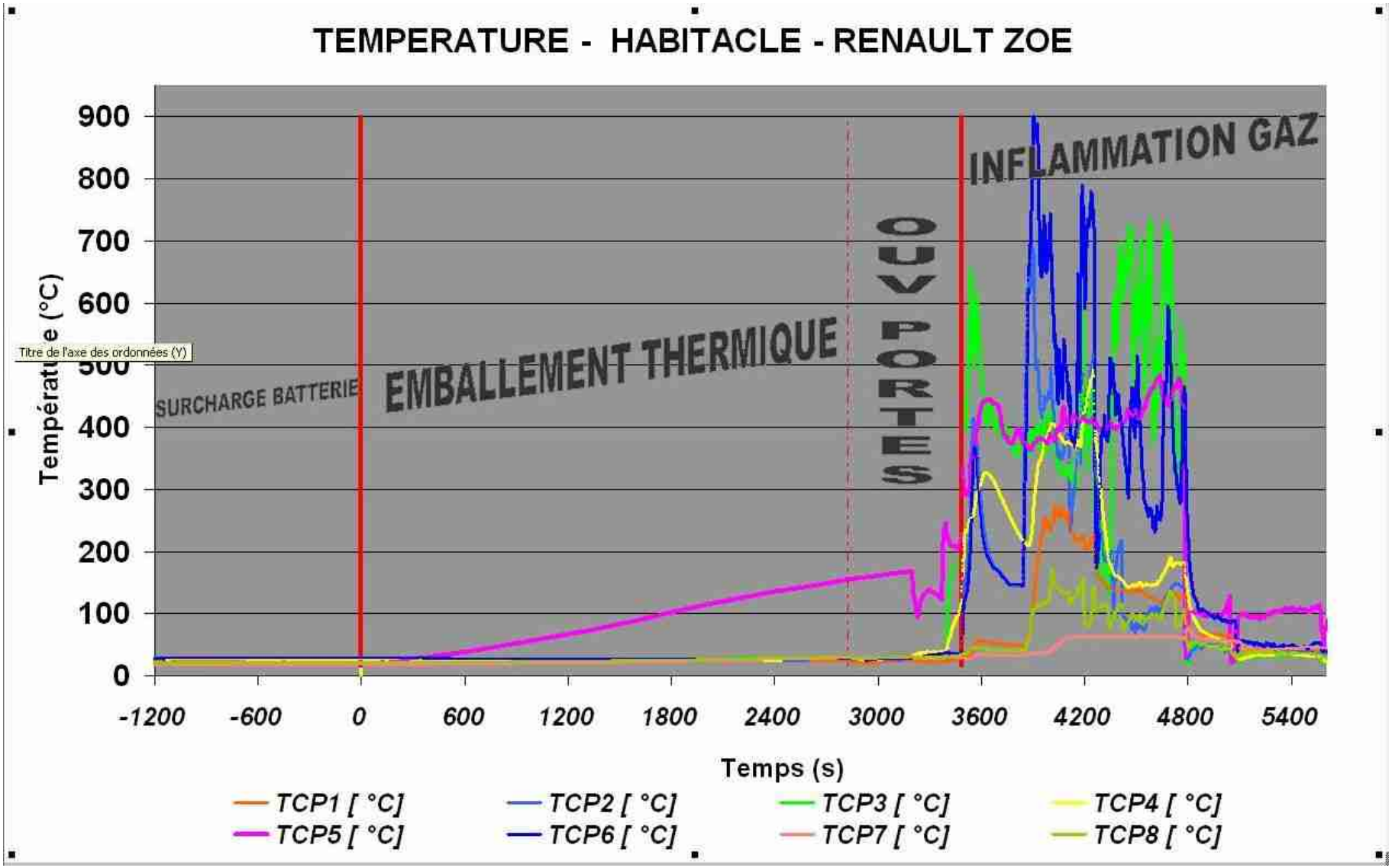
Graphique 2: Mesures de températures sur le pourtour du pack batterie du véhicule



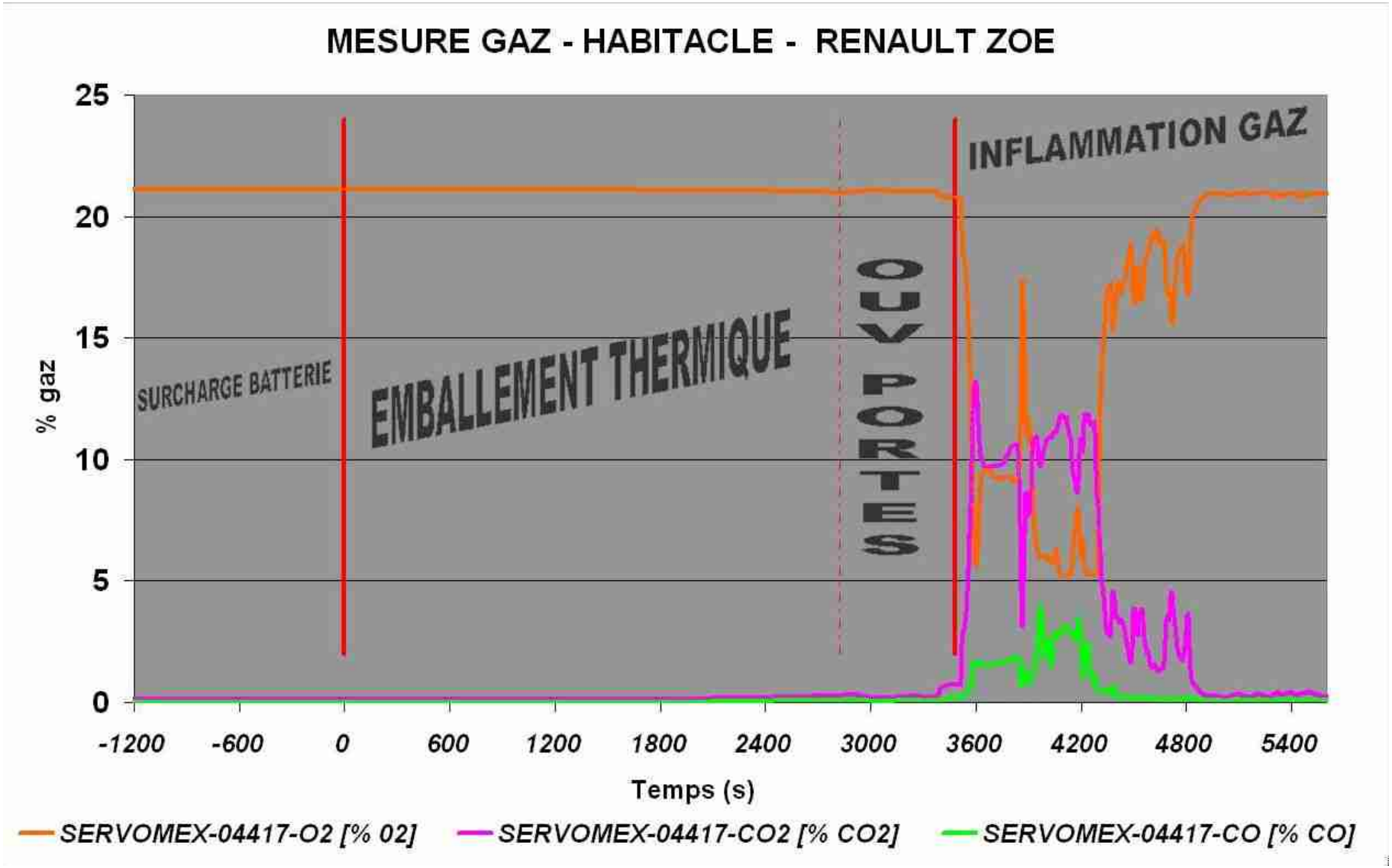
Graphique 3: Températures dans l'environnement du pack batterie.



Graphique 4: Mesures de tensions aux bornes de la batterie de traction du véhicule



Graphique 5: Températures mesurées dans l'habitable du véhicule (°C)



Graphique 6: Mesures de concentrations de gaz dans l'habitacle du véhicule - oxygène, monoxyde de carbone et dioxyde de carbone (Pourcentage volumique)

9 Conclusions

L'objet des essais était d'évaluer l'impact du comportement de la trappe thermo-fusible d'une Renault Zoé sur la propagation d'effluents gazeux dans l'habitacle du véhicule lorsqu'il y a un emballement thermique de la batterie dû à un dysfonctionnement interne.

Il est important de rappeler que, avant l'essai, l'ensemble des sécurités du pack batterie avait été inhibé afin de permettre la surchauffe d'une cellule du module 5. Sans cette inhibition, les systèmes de contrôle auraient selon toute vraisemblance détecté la surcharge et, par conséquent, coupé la charge et ouvert les relais batterie pour son isolation.

La surcharge d'une cellule du module 5 a entraîné son emballement, constaté par :

- une augmentation locale de température, passant de 80 à 600 °C,
- une diminution de la tension aux bornes de la demi-batterie à 0,0425 V/s environ,
- un dégagement de gaz inflammables s'échappant depuis le pack batterie vers l'extérieur du véhicule.

Aucune inflammation de ces gaz n'a cependant été observée sur l'ensemble de la première phase de l'essai (aucune énergie d'activation n'était *a priori* présente dans la zone d'échappement des gaz).

La propagation du défaut à partir de la cellule surchargée du premier module vers d'autres cellules et modules a été relativement lente : la perte de la tension délivrée par une cellule a été observée toutes les 1 min 30 s environ.

La température dans l'environnement proche de la trappe thermofusible a été supérieure à 150 °C, sa température théorique de fusion, après approximativement 26 min (1600 s) d'essai. Après avoir dépassé cette température critique, la trappe n'a pas semblé perdre totalement ses propriétés mécaniques mais est devenue cependant moins perméable qu'initialement. Des gaz provenant du pack batterie ont envahi progressivement l'espace existant entre la trappe et l'assise du siège arrière. La banquette arrière a donc permis, elle aussi, de ralentir la propagation des gaz vers l'habitacle.

Pendant toute la durée de la première phase d'essai suivant la création du défaut, il n'y a eu aucune variation de température dans l'habitacle. Les concentrations en gaz (O_2, CO et CO_2) ont commencé à varier très légèrement après 30 min (1800 s) mais les concentrations sont restées faibles : augmentations de 0,07% en CO_2 et 0,02% en CO et diminution de 0,7% de l'O_2. Les fumées envahissant l'habitacle sont blanches et permettent une visibilité relativement bonne.

À 40 min d'essai, il a été acquis que les conditions d'incapacitation rapide ou de syncope dans l'habitacle n'ont pas été atteintes pour un ou plusieurs passagers. Il a alors été décidé de ne pas procéder au deuxième essai initialement prévu (même véhicule mais sans trappe), ce dernier devenant sans objet. Les gaz générés par l'emballement thermique de la batterie ont alors été enflammés mais cette phase sort de l'objectif initial de l'essai.

Il est important de noter que les gaz dégagés par l'emballement de la batterie sont combustibles. Il est primordial que les sapeurs-pompiers intègrent ce risque lors de leur intervention (port des protections

individuelles adaptées, précaution concernant l'apport d'un énergie d'activation, contrôle de l'atmosphère avec un explosimètre, etc.).

Enfin, les conclusions de l'étude ne sont représentatives que de la configuration des essais. Il n'a de plus été procédé à aucun essai de répétabilité. Il ne peut ainsi être question de généraliser les résultats à des configurations différentes.

10 Annexe vidéo

Vues générales

Vues arrière du véhicule

Vues de l'arrière de l'habitacle

À partir de 30 min environ (1800 s), l'intérieur de l'habitacle se remplit progressivement de gaz provenant de l'emballement de la batterie. Lors de l'ouverture de la porte, 47 min (2820s) après le début de l'essai, l'intérieur du véhicule est ventilé, permettant par conséquent aux gaz confinés de s'échapper.

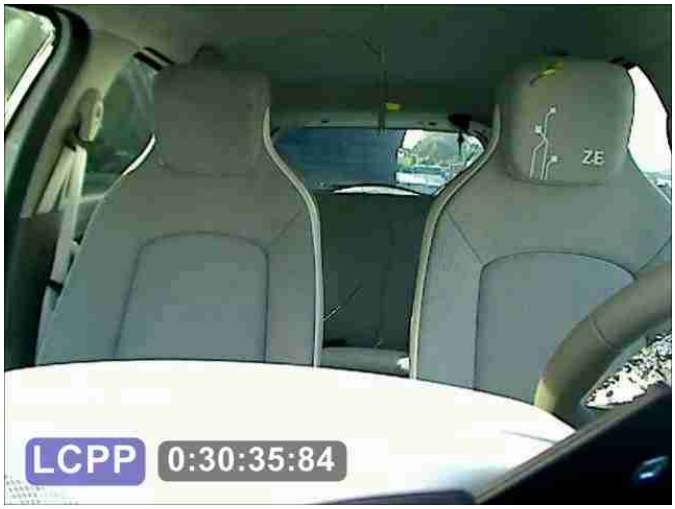
Enlèvement de l'assise du siège arrière laissant apparaître les gaz de combustion s'échappant par la trappe thermofusible préalablement sollicitée par l'emballement de la batterie.

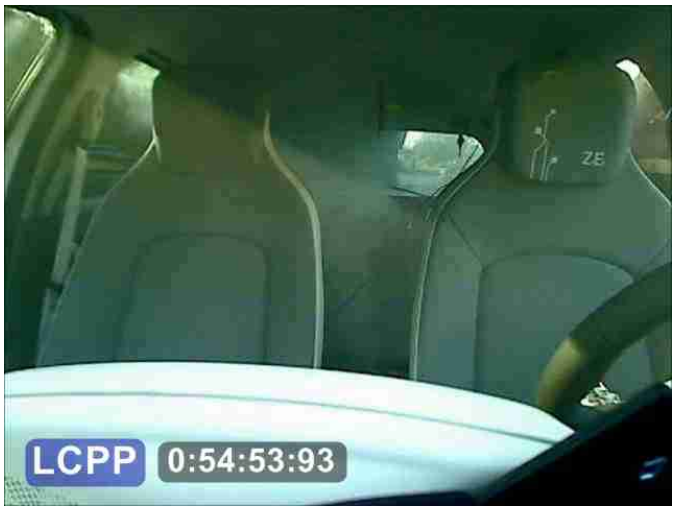
Enlèvement de la trappe thermofusible et augmentation du dégagement gazeux dans l'habitacle.

Flamme s'échappant de l'accès au pack batterie depuis l'intérieur de l'habitacle.

Vues latérales du véhicule

Inflammation, par l'arrière du véhicule, des gaz

	s'échappant de la batterie.
Le foyer se développe dans l'habitacle du véhicule une fois que la porte arrière est ouverte afin de permettre l'oxygénation du foyer.	Extinction par noyage du feu localisé sur la batterie grâce à la trappe thermofusible
Vues à l'intérieur du véhicule	
	Après 30 min d'essai, des fumées commencent à être visibles dans l'habitacle du véhicule.

 La trappe thermofusible a été retirée par les sapeurs-pompiers et une colonne de gaz s'élevant au-dessus du trou communiquant avec le pack batterie est clairement visible.	Les gaz ont été enflammés par les sapeurs-pompiers et le feu de développe à l'intérieur de l'habitacle.