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

Évaluation du comportement d'un véhicule HyKangoo ZE en situation d'incendie en milieu non confiné

Essai réalisé le lundi 2 juin 2014

au Centre de formation des Sapeurs Pompiers de la Vienne, Valdivienne (86)

Rédigé le 18/02/2015 **par :**	**Validé le** 18/02/15 **par :**	**Approuvé le** 18/02/15 **par :**
Mathieu SUZANNE	Hervé BAZIN	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 Range Extender – Prolongateur d'autonomie 3

3.1 Présentation du système range extender 3

3.2 Essai de certification du range extender 3

3.3 Le range extender lors de l'essai auquel participe le LCPP 4

4 Site et dispositif expérimental 4

5 Scénario d'essai 5

6 Installation des matériels et du poste de mesure 6

6.1 Vidéos 6

6.2 Thermocouples (TCP) 7

6.3 Mesure de pression 10

6.4 Tension 11

7 Résultats 11

7.1 Déroulement de l'essai 11

7.2 Températures lors de l'essai 12

7.3 Pression dans le réservoir hydrogène 18

7.4 Examen visuel du véhicule et du réservoir après essai 18

8 Conclusions 20

9 Annexe 22

1 Introduction

Le développement d'énergies alternatives pour le parc automobile nécessite d'une part une évolution permanente des procédures d'intervention des services de secours et d'autre part une adaptation des règlements de sécurité par les législateurs et préventionnistes afin de prendre en compte les nouveaux risques émergeant.

La société Symbio FCell équipe les Kangoo ZE L2 du constructeur Renault d'une pile à combustible. Ce système de production d'énergie électrique intègre un réservoir d'hydrogène, gaz hautement réactif (énergie d'activation faible, de l'ordre de 0,02 mJ) et combustible (domaine d'inflammation compris entre 4 et 75 vol% dans l'air). Il convient donc, pour la sécurité du public et des premiers intervenants, d'étudier le comportement du système de production d'énergie intégré dans des conditions de sollicitations sévères mais représentant toujours un scénario réaliste.

Pour ce faire, Renault et Symbio FCell ont mis à disposition des services de secours et d'intervention, un véhicule HyKangoo ZE fonctionnel pour effectuer des tests au Centre de Formation des Sapeurs-Pompiers de la Vienne, Le Petit Passage de Saint-Martin, 86300 Valdivienne.

Ces essais ont été réalisés en collaboration avec les SDIS de la Vienne (86) et de Loire-Atlantique (44), ainsi que « Mouthon formation », spécialisé dans la formation sur les problématiques de gaz (GNV, hydrogène, GPL...).

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

2 Objet

L'objet de l'essai était d'évaluer le comportement du réservoir d'hydrogène alimentant une pile à combustible lorsque le système Range Extender de Symbio FCell est intégré dans un véhicule soumis à un incendie dans son espace de chargement ainsi que dans l'habitacle.

3 Range Extender – Prolongateur d'autonomie

3.1 Présentation du système range extender

Le « range extender », développé par Symbio FCell, est constitué d'une « baignoire » en PE/Fibre de verre de 5 mm d'épaisseur disposée dans le plancher du Kangoo, entre le pack batterie et le compartiment conducteur avant (voir Photo 1). Dans cette baignoire, un réservoir est placé ; il contient 1,8 kg d'H_2 à 350 bars de pression. Le réservoir, d'une contenance d'environ 74 l d'eau, est de type 3 (liner alu entièrement bobiné de fibres/matières thermo-durcissable ou plastique).

3.2 Essai de certification du range extender

Le réservoir et son dispositif de sécurité ont fait l'objet, lors de la phase de développement du produit, d'un essai « feu » de certification suivant l'EC 79/2009 en connexion avec le VO 406. Lors de ce test

réalisé par Dynetek, le produit, fixé sur un support métallique, a été soumis à une source de chaleur uniforme produite à l'aide d'un brûleur au propane de 700 x 1650 mm².

La température du réservoir a été mesurée en quatre points lors de l'essai à l'aide de thermocouples protégés d'un impact direct de la flamme par une protection métallique. Un cinquième thermocouple a été fixé à proximité de la valve du Pressure Relief Device (PRD). En cas de surpression dans le réservoir, le PRD s'active et permet au gaz de s'échapper, limitant ainsi les risques d'explosion du contenant.

Lors de l'essai de certification, une fois l'activation du « glass bulb » du PRD à 110°C, la pression interne du réservoir passe de 36,6 MPa à 10 MPa en une dizaine de secondes et atteint 1 MPa en moins d'une minute. Il faut environ 2 minutes pour que la pression dans le réservoir soit de 0,1 MPa.

3.3 Le range extender lors de l'essai auquel participe le LCPP

Le range extender a été installé en configuration commerciale. Il était constitué d'une tête de bouteille, des lignes de détente haute vers moyenne puis basse pressions, d'une électrovanne fonctionnelle entre l'emplacement de la pile et le réservoir d'hydrogène et de la ligne de remplissage. Aucune continuité électriquen'existait entre le range extender, la pile à combustible et la batterie de traction. La batterie de traction était complètement chargée (400 V) et le relais fermé.

Le réservoir hydrogène avait une pression interne de 31 MPa (1,58 kg d'hydrogène) au début de l'essai.

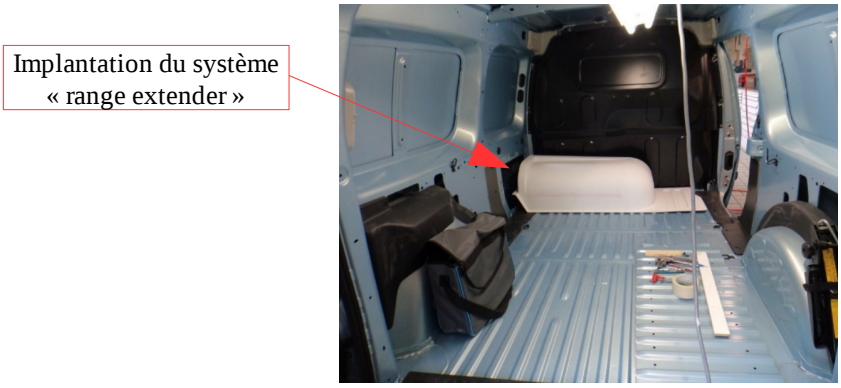


Photo 1: Emplacement du « range extender » dans le compartiment arrière du Kangoo.

4 Site et dispositif expérimental

Le site d'essai était situé au Centre de Formation des Sapeurs-Pompiers de la Vienne, Le Petit Passage de Saint-Martin, 86300 Valdivienne.

Le dispositif expérimental a été limité à l'aire de manœuvre des sapeurs-pompiers, indiquée par la surface rouge sur la Photo 3. Un périmètre de sécurité de l'ordre d'une centaine de mètres a été réalisé autour du véhicule concerné par l'essai.

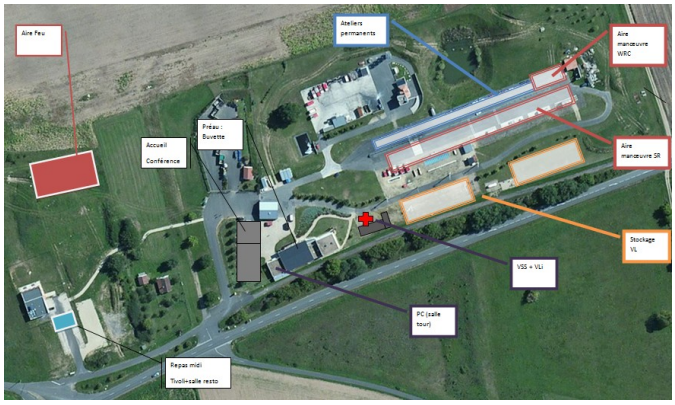


Photo 2: Aire de brûlage sur le site du Centre de Formation, délimitée par une surface rouge dans l'image ci-dessus.

Photo 3: Implantation du véhicule sur l'aire de brûlage.

5 Scénario d'essai

Le véhicule HyKangoo ZE a été stationné sur l'aire d'essai sur ses quatre roues.

L'utilitaire possédait deux portes latérales coulissantes et deux portes arrières battantes mais aucune surface vitrée dans son espace de chargement (Photo 4). L'habitacle était séparé de l'espace de chargement par un panneau métallique.

Le véhicule a été maintenu en position parking lors de l'essai afin de simuler un incendie suite à un accident ou une mise de feu volontaire lors d'une opération de chargement. L'électrovanne reliant le réservoir d'hydrogène à la pile à combustible était par conséquent fermée. La pile à combustible, n'étant alors plus considérée comme un élément potentiellement à risque car non alimentée, n'a pas été installée sur le véhicule testé.

Des cartons (dont la masse totale n'a pu être estimée) ont été disposés dans l'espace de chargement en zone arrière du véhicule afin de reproduire un scénario d'usage courant de l'utilitaire. La porte latérale de l'espace de chargement côté passager a été maintenue en position ouverte lors de l'essai afin de permettre la propagation de l'incendie au chargement ainsi qu'une meilleure ventilation lors de sa combustion. Pour les mêmes raisons, la fenêtre avant côté passager a été laissée ouverte.

Photo 4: Charge calorifique disposée dans l'espace de chargement du véhicule.

La mise de feu a été réalisée par « Mouthon Formation » à l'aide d'une charge pyrotechnique disposée sur un accélérant répandu dans l'habitacle et l'espace de chargement.

L'extinction a été demandée par le responsable de l'essai une fois qu'il n'y avait plus de signe visible d'expulsion de l'hydrogène à partir du réservoir.

6 Installation des matériels et du poste de mesure

Le poste central des mesures (PC) et les matériels d'acquisition et d'enregistrement ont été installés dans une tente mise à disposition par le Centre de formation de la Vienne. Elle a été placée à une cinquantaine de mètres de distance du véhicule instrumenté.

6.1 Vidéos

Une webcam a été installée à proximité du véhicule afin de filmer l'ensemble de la voiture vue depuis le côté passager (voir Photo 5).

Une seconde webcam a été disposée contre la porte arrière gauche de l'espace de chargement afin de filmer l'intérieur du véhicule par un trou préalablement percé (voir Photo 6).

Une GoPro a été utilisée pour enregistrer une vue générale côté conducteur (Photo 7).

L'essai a également été filmé par le service communication du SDIS 44.

Photo 5: Vue latérale enregistrée à l'aide d'une webcam.

Photo 6: Vue de l'espace de chargement arrière enregistrée à l'aide d'une webcam.

Photo 7: Vue générale enregistrée à l'aide d'une GoPro.

6.2 Thermocouples (TCP)

Un total de vingt thermocouples a été installé sur le véhicule pour le présent essai.

Les thermocouples installés autour du réservoir hydrogène avaient été placés le mardi 27 mai sur le site de Symbio FCell de Grenoble par le personnel du LCPP. Les thermocouples restant ont été mis en place le jour de l'essai, le lundi 2 juin.

Le LCPP s'est chargé de l'acquisition de l'ensemble des thermocouples.

Huit thermocouples ont été installés sur le réservoir d'hydrogène comme indiqué sur l'Illustration 1.

Les thermocouples T2 à T8 ont été fixés sur la partie externe du réservoir par le LCPP. Ils ont été utilisés pour comparer les niveaux thermiques atteints localement lors de l'essai (situation réelle) avec les valeurs enregistrées lors du test de certification réalisé par Dynetek sur le réservoir équipé de son PRD.

Le thermocouple T1, isolé de son environnement extérieur à l'aide d'une pâte en silicone de type CAF 3, a été installé sur le système PRD.

Dans son usage courant, la température à l'intérieur du réservoir d'hydrogène est suivie par le thermocouple Ti. L'acquisition du signal de ce thermocouple se fait par thermistance. Notre système d'acquisition étant limité à 20kΩ, il n'a pas été possible d'enregistrer, lors de l'essai, les valeurs de ce capteur.

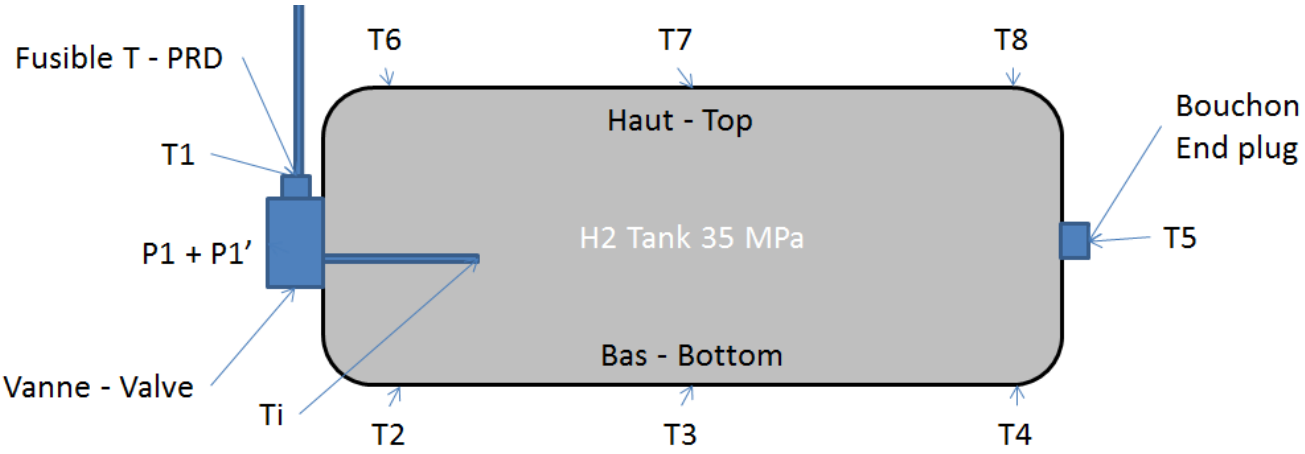


Illustration 1: thermocouples installes sur le réservoir d'hydrogène.

Le thermocouple T9 a été implanté à environ 10 cm à l'intérieur de la sortie de l'évent afin de mesurer la température de sortie des gaz (voir Illustration 2 et Photo 8). La pression d'échappement étant élevée (de l'ordre de 450 bars), le thermocouple a été maintenue sur le tube inox de l'évent à l'aide de colliers métalliques.

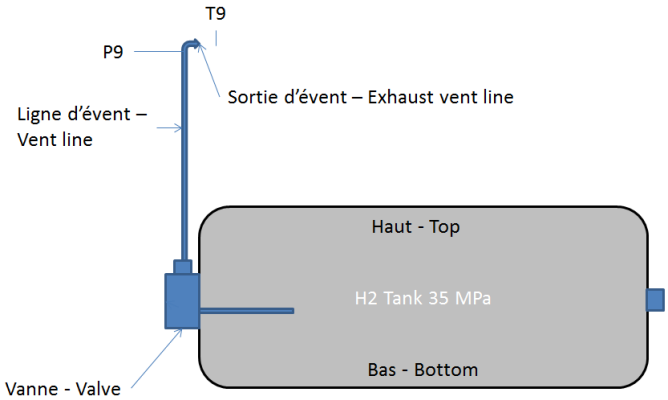


Illustration 2: implantation schématique du thermocouple T9 en sortie d'évent.

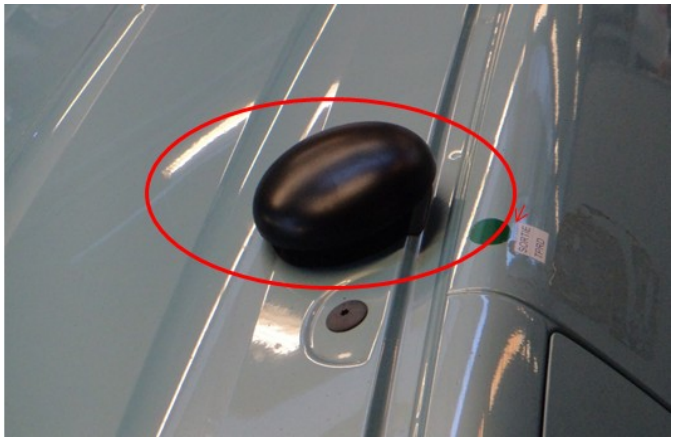


Photo 8: champignon couvrant la sortie de l'évent sur le toit du véhicule.

Le thermocouple T10 a été implanté sur le raccord de la ligne de purge avec la partie du champignon disposée à l'intérieur du véhicule (Photo 9).

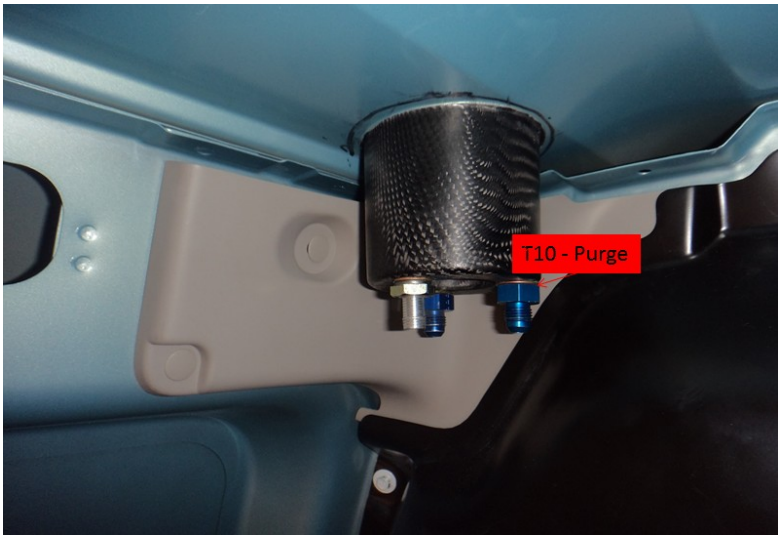


Photo 9: Implantation du thermocouple T10 sur le raccord de la ligne de purge.

Comme indiqué sur la Photo 10, le thermocouple T11 a été disposé sur la ligne de remplissage qui est située au-dessus du passage de roue arrière côté conducteur dont elle n'est séparée que par une protection en matières plastique.

Photo 10: Implantation du thermocouple sur la ligne de remplissage.

Les thermocouples T12 et T13 ont été installés sur le toit à une distance de 100 mm de l'axe de symétrie de la cheminée comme indiqué sur la Photo 11.

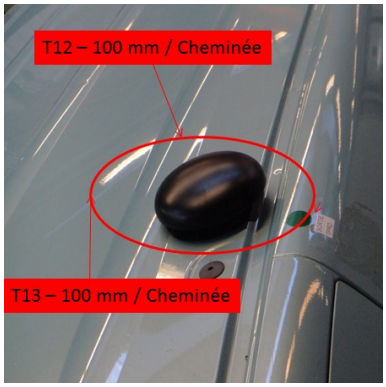


Photo 11: Implantation des thermocouples T12 et T13 autour de la cheminée sur le toit du véhicule.

Comme indiqué sur la Photo 12, quatre thermocouples ont été disposés sur l'extérieur du capotage du landau couvrant le réservoir d'hydrogène.

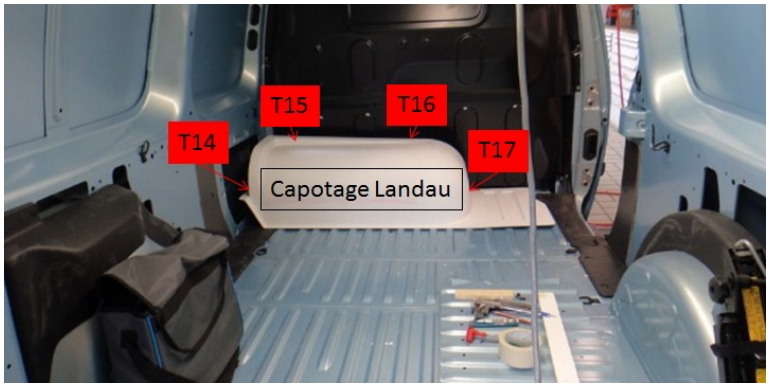


Photo 12: Thermocouples T14 à T17 implantés sur le capotage du landau.

Le thermocouple T18 a été disposé dans l'habitacle du véhicule, contre la paroi métallique le séparant de l'espace de chargement.

Le thermocouple T19 a été placé dans l'espace de chargement du véhicule.

Le thermocouple T20 a été inséré sous le tunnel à l'extérieur du véhicule.

Tous les thermocouples étaient de type K, gainés en Inconel et d'un diamètre de 1,5 mm. Ils ont été fixés sur les éléments mécaniques accessibles. Ils ne sont représentatifs que des températures relevées aux points de mesure, c'est-à-dire dans l'environnement proche de l'organe visé.

6.3 Mesure de pression

Deux mesures de pression (P1 et P1') devaient être réalisées en tête de bouteille à l'emplacement indiqué sur l'Illustration 3.

L'acquisition n'a pu être effectuée avec le matériel de « Mouthon formation ».

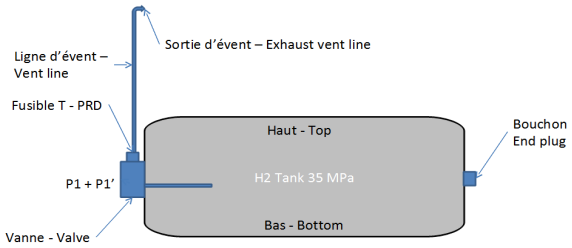


Illustration 3: Mesure de pression sur la tête de bouteille.

6.4 Tension

Aucune mesure de tension n'a été réalisée aux bornes de la batterie de traction.

7 Résultats

7.1 Déroulement de l'essai

La totalité de l'essai enregistré par les vidéos est résumée en images dans l'Error: Reference source not found.

Le PRD s'est activé 12 minutes après la mise de feu dans l'habitacle et l'espace de chargement du véhicule. Cela s'est traduit par une expansion rapide du volume de flamme et un changement dans le régime de combustion de ces flammes.

Après l'ouverture du PRD, la combustion la plus vive et importante a duré environ 20 secondes avant de décroître de façon significative pour s'arrêter environ 1 minute après l'activation du système de dépressurisation du réservoir hydrogène. Par la suite, l'incendie observé était classique d'un feu de véhicule utilitaire.

Lors de l'activation du PRD, un affaissement du réservoir dans sa bassine a été observé, entraînant également le système d'évacuation des gaz (ligne d'évent) vers le bas. L'hydrogène contenu dans le réservoir a donc été libéré dans l'espace de chargement et non pas à l'extérieur du véhicule comme souhaité initialement.

L'extinction par deux binômes de sapeurs-pompiers a duré environ 315 secondes.

Avant activation du PRD	*Après activation du PRD*

7.2 Températures lors de l'essai

Les températures enregistrées lors de l'essai ont été tracées dans les graphiques 1 à 5.

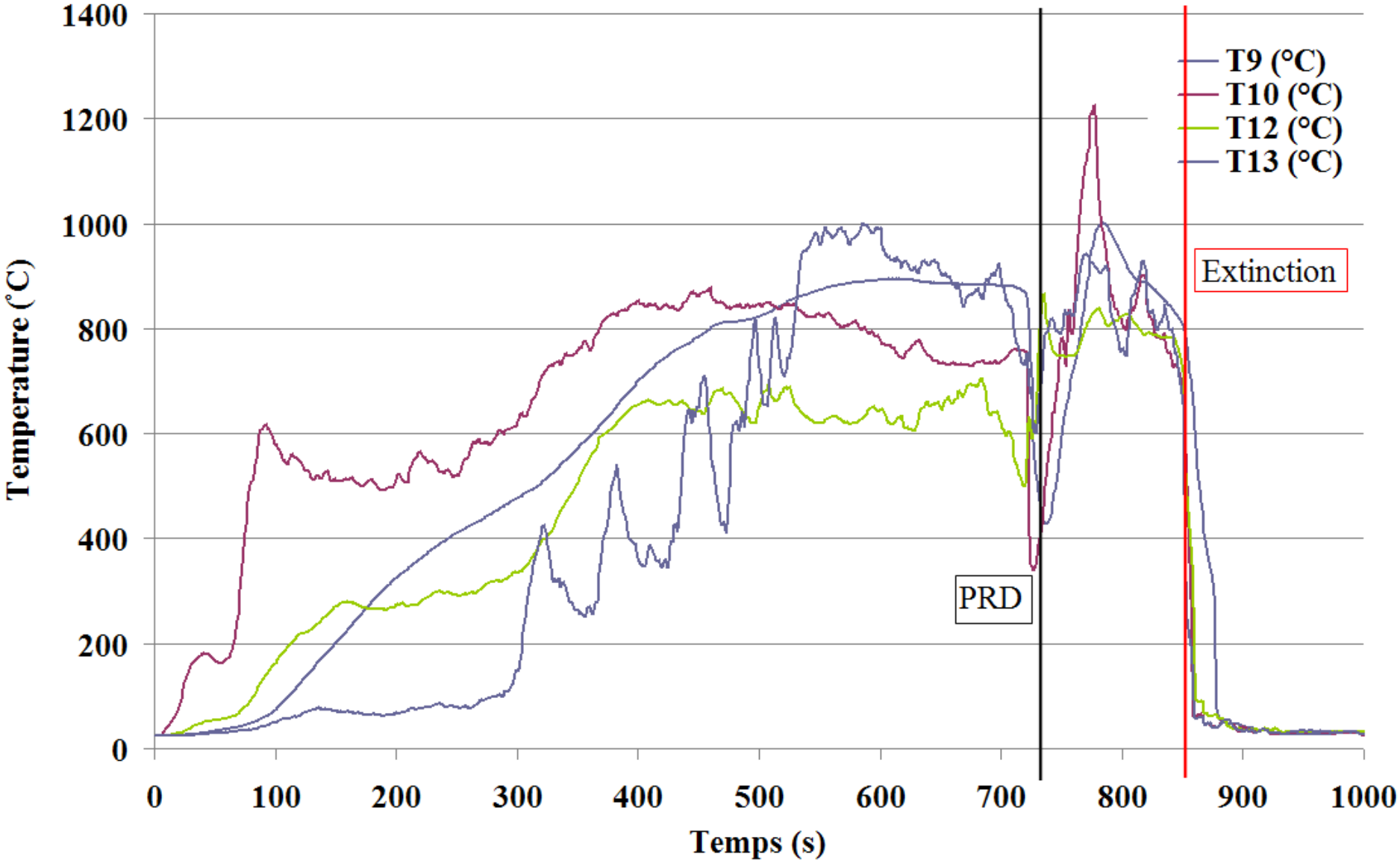
Les températures sous le réservoir hydrogène, dans la baignoire, restent inférieures à 150 °C sur la totalité de l'essai.

Sur la partie supérieure du réservoir, les températures, avant activation du PRD, sont de l'ordre de 450 °C. En comparaison avec l'essai de certification, ces températures sont inférieures de 400 à 500 °C (en fonction de la position du point de mesure). L'essai de certification est donc nettement plus sévère, pour le réservoir et son PRD, que la mise en situation réelle avec chargement. Cela peut s'expliquer par une attaque thermique d'intensité légèrement inférieure lors de la mise en situation (environ 1200°C pour l'essai de certification contre 1000 °C [voir Graphique 4]) ainsi que par la protection supplémentaire constituée par le capotage de protection en fibres de verre.

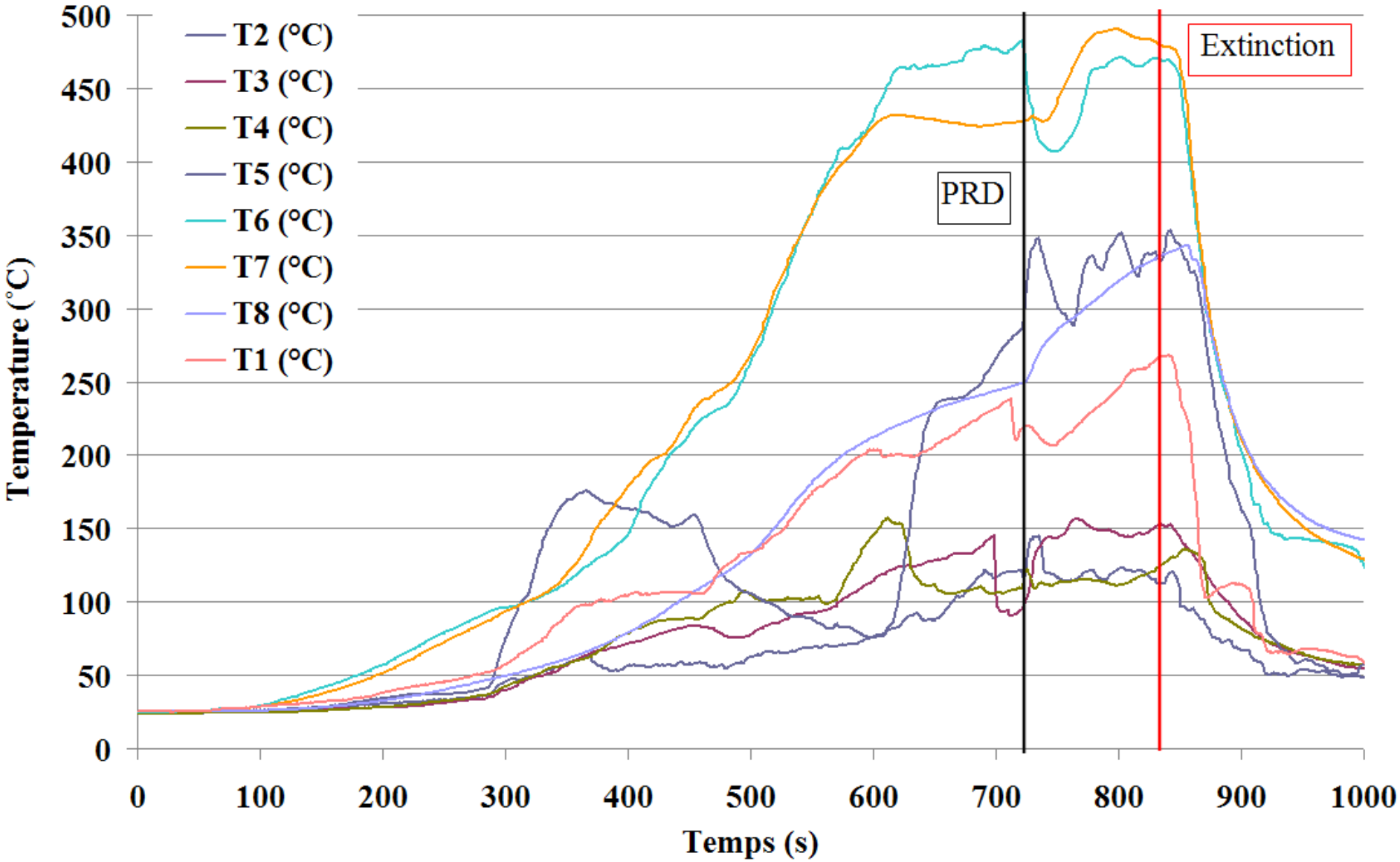
Lors de l'activation du PRD, la température dans son proche voisinage est de l'ordre de 240 °C.

Après activation du PRD, les températures dans le véhicule, relativement homogènes, sont comprises entre 800 et 1000°C.

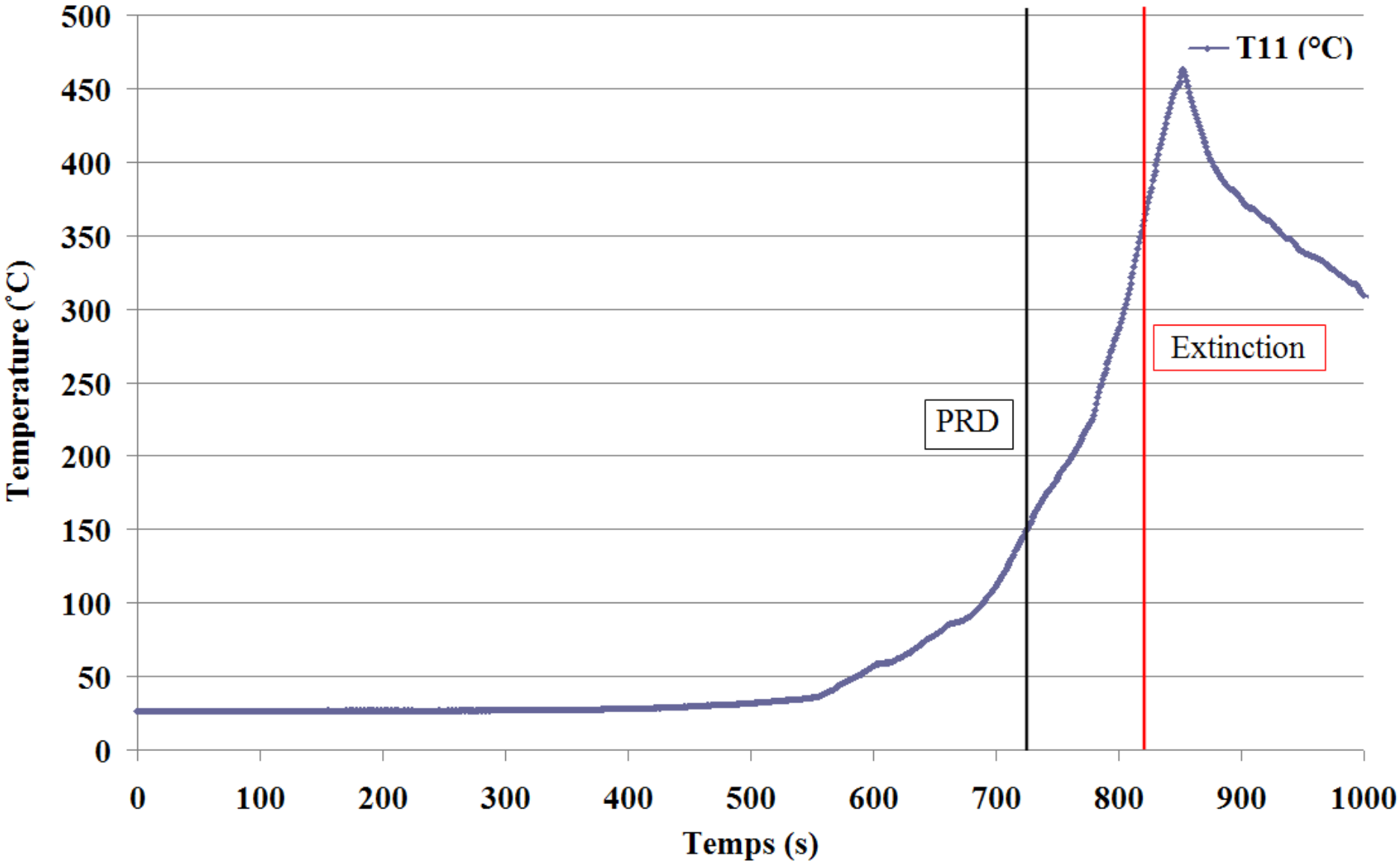
Sur l'ensemble de l'essai, la température sous le véhicule ne dépasse pas 70 °C.



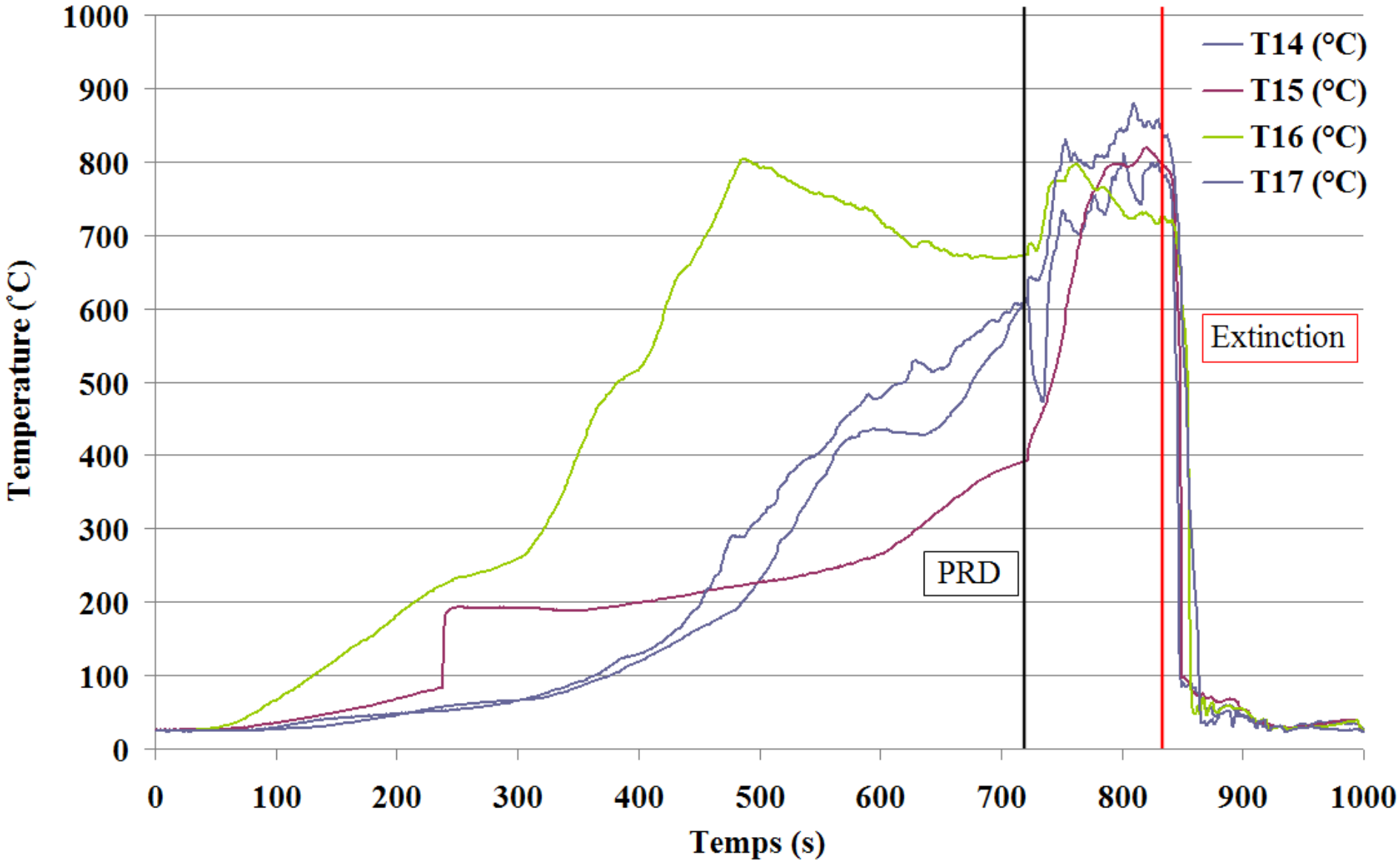
Graphique 1: Températures (°C) mesurées sur et autour du champignon de l'évent.



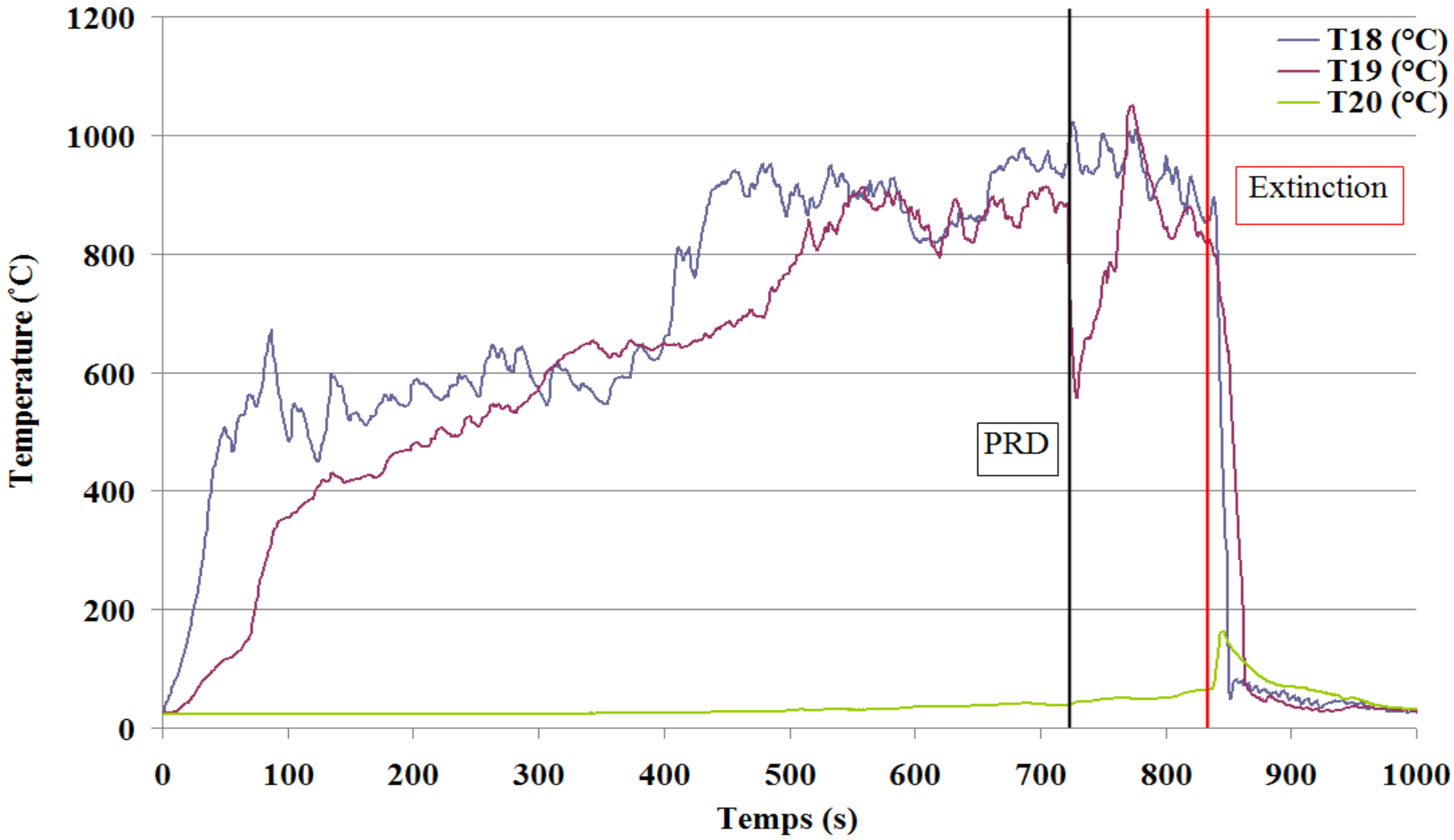
Graphique 2: Températures (°C) mesurées sur le réservoir hydrogène.



Graphique 3: Température (°C) mesurée sur la trappe de remplissage.



Graphique 4: Températures (°C) mesurées sur le capotage de protection en fibres de verre du landau.



Graphique 5: Températures (°C) d'ambiance.

7.3 Pression dans le réservoir hydrogène

Lors de l'essai de certification du réservoir, la pression interne passe de 36,3 MPa à 1 MPa en 52s, après l'activation du dispositif de dépressurisation.

Les mesures de pression du réservoir n'ayant pas pu être effectuées par « Mouthon formation » lors de l'essai, il est donc impossible de faire une comparaison directe en l'essai de certification et la mise en situation.

Il semble cependant possible, visuellement, d'estimer le temps nécessaire pour que le réservoir d'hydrogène se vide de la majorité du combustible qu'il contenait initialement (31 MPa). Moins d'une minute après le déclenchement du PRD, il apparaît, à la structure des flammes, que la majorité de l'hydrogène a été expulsée du réservoir.

Les temps de décharge sont donc comparables entre l'essai de certification et la mise en situation.

7.4 Examen visuel du véhicule et du réservoir après essai

Photo 13: Véhicule côté conducteur - début de propagation au pneu arrière. Pas d'effets marqués au niveau de la trappe de remplissage.

Photo 14: Véhicule côté passager - oxydation plus marquée au niveau du haut de la porte avant et début de propagation au pneu avant.

Photo 15: Habitacle du véhicule.

Photo 16: Baignoire dans l'espace de chargement - logement de la bouteille hydrogène.

Photo 17: Réservoir hydrogène - côté PRD. Aucune déformation du réservoir n'a été observée.

Photo 18: Zone composite constituant le réservoir.

Photo 19: Système de détente et PRD implantés sur le réservoir hydrogène - vue après incendie. Le capotage en fibres de verre est efficace pour limiter l'attaque thermique sur les organes de sécurité implantés sur le réservoir.

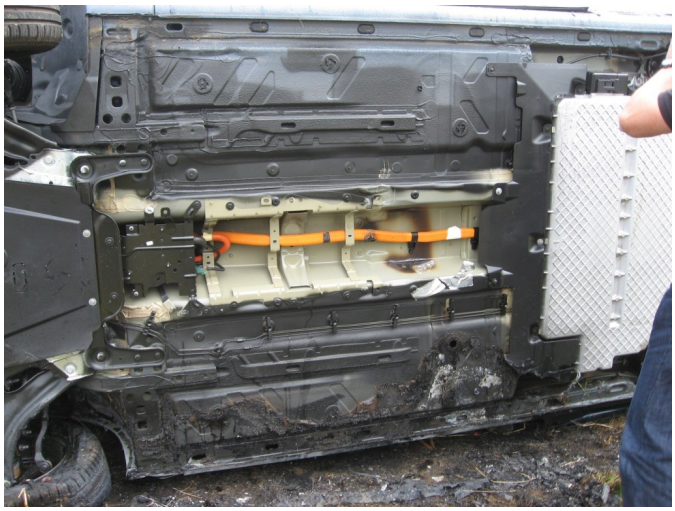


Photo 20: Câbles et batterie 400 V très peu impactés par l'incendie.

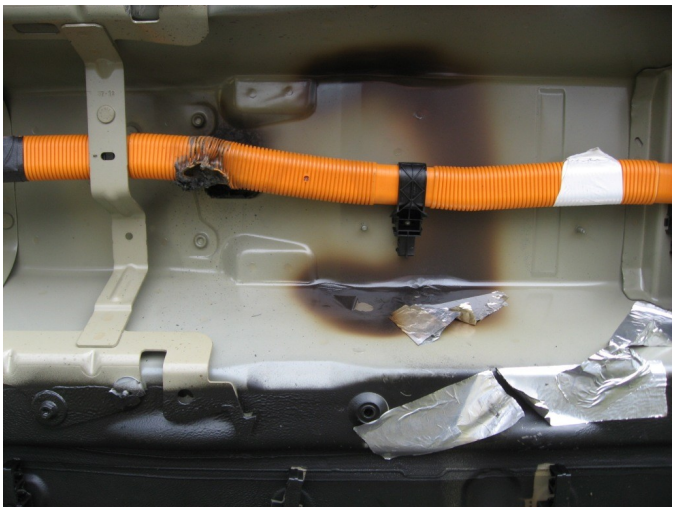


Photo 21: Détail du câble relié à la batterie, légèrement endommagé.

8 Conclusions

Afin d'augmenter l'autonomie des véhicules électriques, un prolongateur construit autour d'une pile à combustible peut être utilisé. Cette pile utilise de l'hydrogène comme combustible. Ce gaz est inflammable par une énergie d'activation très faible (de l'ordre de 0,02 mJ) sur une large plage de mélange comprise dans l'air entre 4 et 75 vol%.

L'intégration sur le véhicule de cet hydrogène stocké sous pression (environ 36 MPa) dans un réservoir, couplé aux risques déjà identifiés des batteries Li-ion, impose donc d'étudier, lors d'un incendie, le comportement de la voiture sur la sécurité pour le public et les premiers intervenants de ce couplage de technologie.

Le scénario considéré pour l'essai a été une mise de feu volontaire dans l'habitacle et l'espace de chargement. La fenêtre avant passager et la porte latérale arrière côté passager ont été maintenues ouvertes pour l'essai. L'espace de chargement avait été rempli de plusieurs sacs et cartons supposés représentatifs d'un usage quotidien du véhicule.

La batterie de 400 V était pleinement chargée au début de l'essai. Le réservoir d'hydrogène était également rempli à une pression initiale de 31 MPa (1,58 kg d'hydrogène). Le véhicule n'était, pour l'essai, pas équipé de pile à combustible, le scénario choisi ne l'impliquant pas (différents relais fermés). Le reste du range extender avait été installé en configuration commerciale.

L'essai mené a permis d'observer que :

- la combustion de l'hydrogène n'a pas eu d'impact visible sur la batterie de traction, n'entraînant pas son emballement thermique ;

- l'essai en situation réelle est légèrement moins sévère que l'essai de certification du réservoir et de son PRD ;

- le PRD a cependant un comportement identique sur les deux essais puisque les temps de dépressurisation du réservoir sont très proches ;

- le capotage du réservoir en fibres de verre installé au dessus de la baignoire afin d'englober le réservoir d'hydrogène et ses composants de sécurité est efficace pour protéger le réservoir de l'attaque thermique et par conséquent retarder l'activation du PRD.

- lors de l'activation du PRD, un affaissement du réservoir dans sa bassine a été observé, entraînant également les systèmes d'évacuation de la cheminée vers le bas. L'hydrogène contenu dans le réservoir a donc été libéré dans l'espace de chargement et non pas à l'extérieur du véhicule comme souhaité initialement. Une réflexion sur cette solution technique, inattendue, pourrait être menée. En effet, le dégagement de l'hydrogène dans l'espace de chargement clos (pas de surface vitrée présente à l'arrière du véhicule testé), pourrait limiter les effets, sur son environnement (structure, véhicules adjacents, services de secours, etc.), de la combustion de l'hydrogène à la sortie de l'évent à l'extérieur de la voiture. Tout rejet de l'hydrogène sous le véhicule reste cependant à proscrire car cela impacterait directement le pack batterie.

- l'hydrogène utilisé pour cette technologie représente une charge calorifique supplémentaire qu'il conviendra d'intégrer dans toute étude d'ingénierie impliquant ce type de véhicule.

9 Annexe

	t_0+17 s : l'allumage a été réalisé dans l'espace de chargement (porte ouverte) et l'habitacle (fenêtre passager ouverte) à l'aide d'un inflammateur appliqué sur un liquide inflammable.
	t_0+1 min : les flammes se développent rapidement dans l'habitacle et sortent par la fenêtre conducteur. À l'arrière, le développement sur les matériaux stockés est plus lent.
	t_0+1 min 30 s : le développement dans l'habitacle continue de s'accélérer. La quantité de fumée produite augmente.

	t_0+3 min : le feu continue de se développer à l'arrière du véhicule alors que dans l'habitacle, l'intensité semble décroître.
	t_0+6 min : l'intensité du foyer dans l'habitacle de la voiture et le compartiment arrière augmente progressivement. Des flammes commencent à sortir de l'habitacle.
	t_0+7 min : la taille des flammes s'échappant de l'habitacle continue de croître.

	T_0+8 min : l'intensité du foyer sur le véhicule est stable.
	t_0+10 min : l'intensité du foyer dans le compartiment arrière décroit mais reste stable dans l'habitacle.
	t_0+10 min 30 s : un regain d'intensité est observé dans l'habitacle. Des matières plastiques en fusion tombent sur le pneu avant conducteur.

	t_0+12 min 01 s : l'intensité des flammes dans l'habitacle décroit légèrement.
	t_0+12 min 01 s : activation du PRD. Il s'en suit une forte expansion du volume de flamme.
	t_0+12 min 03 s : la taille des flammes à l'extérieur du véhicule augmente. Le régime des flammes est modifié. L'inflammation de l'herbe de l'aire de stationnement est observée.

	t_0+12 min 44 s : l'intensité des flammes s'échappant de l'espace de chargement décroit. La production de fumée semble augmenter.
	t_0+12 min 56 s : l'intensité du foyer dans l'espace de chargement du véhicule est pratiquement, revenu à un niveau identique à celui observé avant l'activation du PRD. L'intensité du foyer dans l'habitacle est, quant à elle, plus importante qu'avant l'activation du PRD.
	t_0+13 min 55 s : le feu continue de se propager vers l'avant du véhicule, au pneu notamment. L'intensité du foyer dans l'espace de chargement décroit toujours.

	t_0+13 min 57 s : intervention des sapeurs-pompiers qui procèdent à l'extinction de l'incendie de véhicule.
	t_0+14 min 08 s : le foyer sur la roue avant passager est éteint. Un binôme attaque l'habitacle alors que le second se concentre sur l'espace de chargement.
	t_0+15 min 06 s : feu maîtrisé sur le véhicule – extinction des foyers résiduels.

Images SDIS 44	
	t_0+6 min 01 s : une combustion avec flamme de la peinture de la carrosserie côté passager est observée.
	t_0+7 min 27 s : le feu continue de se développer dans l'habitacle et la taille des flammes qui s'échappe par la fenêtre passager de croître. Le pare-brise commence à céder.
	t_0+11 min 55 s : l'incendie est pleinement développé dans l'habitacle. Le pare-brise et la vitre conducteur ont cédé. Le pneu arrière côté conducteur s'est enflammé après la chute des matières plastiques constituant le passage de roue.
	t_0+12 min : augmentation du volume de flamme suite au déclenchement du PRD. Le régime de flamme change à cause du dégagement, sous pression, de l'hydrogène combustible.

	t_0+12 min 25 s : la taille des flammes s'échappant par la porte latérale conducteur laissée ouverte diminue alors que celles s'échappant par le côté conducteur, maintenu fermé pendant l'essai sont toujours constantes.
	t_0+12 min 57 s : la majorité de l'hydrogène contenu dans le réservoir semble avoir été dégagée. L'intensité du foyer localisé dans l'habitacle est toujours importante.