



Mesures Physiques & sciences de l'Incendie Ingénierie Du Feu

# Rapport d'essai n°15/10119

# FEU EN INFRASTRUCTURE DE VÉHICULE ÉLECTRIQUE AVEC PROLONGATEUR D'AUTONOMIE À HYDROGÈNE

# SUR LE SITE *DE LA CASERNE MELLINET, RUE DU GÉNÉRAL BUAT, NANTES*

Essai réalisé le mercredi 16 décembre 2015

**Responsable de l'essai :** SUZANNE Mathieu

#### Rapport d'essai

Rédigé le 26/02/2016	Validé le 08/03/2016	Approuvé le 18/03/2016
par : SUZANNE Mathieu	par THIRY Aurélien	par BAZIN Hervé
	Version n° 2	Du: 18/03/2016



# Sommaire

1 Introduction	3
1.1 Thème de l'étude	3
1.2 Technologie du prolongateur d'autonomie	3
1.3 Études, dans la littérature, sur les véhicules intégrant de l'hydrogène	4
1.4 Essai en milieu ouvert	4
1.5 Essais en milieu semi-confiné	5
2 Objet de l'essai	6
3 Modification de la zone de rejet d'hydrogène	6
4 Site expérimental	6
5 Conditions d'essai, aménagement, foyer et ventilation	7
5.1 Aménagement du local d'essai	7
5.2 Foyer	8
5.3 Ventilation	9
5.4 Scénario d'essai	9
6 Moyens de mesure, d'acquisition et d'enregistrement vidéo	9
6.1 Introduction	9
6.2 Températures dans le local d'essai	9
6.3 Flux thermique incident	11
6.4 Mesure différentielle de pression	11
6.5 Températures sur le système prolongateur d'autonomie et le véhicule Kangoo	
6.6 Températures sur la batterie de traction 400 V	
6.7 Mesure de pression du réservoir à hydrogène	12
6.8 Vidéos	12
7 Essais	12
7.1 Conditions initiales dans le local	12
7.2 Déroulement	12
8 Résultats	22
9 Conclusion_	30
10 Bibliographie	31
11 Annexe 1 – Analyses vidéo	32
11.1 Analyse de l'enregistrement vidéo IP1	32
11.2 Analyse de l'enregistrement vidéo IP2	41
11.3 Analyse de l'enregistrement vidéo GP-LCPP	
11.4 Analyse de l'enregistrement vidéo GP-SDIS 44	61



#### 1 Introduction

#### 1.1 Thème de l'étude

Le contrôle des émissions de gaz à effet de serre est une problématique d'actualité visant à réduire le réchauffement climatique. L'utilisation de véhicules aux motorisations moins polluantes est un moyen de réduction des émissions. Différentes politiques vont dans ce sens : existence de taxes visant les véhicules les plus polluants, zones à bas niveau d'émission (LEZ ou ULEZ) et à zéro émission (ZEZ) dans certaines villes, etc. Dans ce contexte, le développement des véhicules à motorisation électrique a été favorisé. Cependant, l'autonomie actuelle de ces véhicules électriques, autour de 120 km environ, mais dépendant fortement des températures d'utilisation, de l'état de la batterie ou encore de la topographie du parcours, ne sont parfois pas compatibles avec les contraintes économiques des utilisateurs. Plusieurs alternatives ont vu le jour afin d'étendre leur autonomie. Une solution peut consister à intégrer un petit moteur thermique susceptible de recharger la batterie si nécessaire (Chevrolet Volt ou BMW i par exemple). Une autre technologie utilise une pile à combustible comme source d'électricité complémentaire à la batterie Li-ion de traction.

Dans le cas d'une pile à combustible, un combustible réducteur (généralement l'hydrogène mais pouvant être du méthanol) est oxydé sur une électrode. Une membrane, imperméable aux électrons qui sont captés par l'anode, permet la circulation d'ions H<sup>+</sup> vers la cathode. Une réduction s'y produit alors avec les ions O<sup>2-</sup>, produisant de l'eau qui est rejetée à l'extérieur du système.

Cette technologie de production d'énergie électrique intègre par conséquent un réservoir d'hydrogène, gaz hautement réactif (énergie d'activation faible, comprise entre 0,02 et 10 mJ en fonction de la concentration [1]) et combustible (plage d'inflammabilité comprise entre 4 et 75 vol% dans l'air). Deux risques principaux sont donc associés à l'utilisation de ce combustible : le premier est l'incendie et le second, en milieu confiné, l'explosion [2].

# 1.2 Technologie du prolongateur d'autonomie

Le prolongateur d'autonomie, développé par Symbio FCell dans le cadre de la présente étude, est implanté dans l'espace de chargement du Kangoo ZE, à proximité de la cabine conducteur (voir les photos 1 et 1). Un réservoir de type 3 (liner alu entièrement bobiné de fibres/matières thermo-durcissables ou plastiques) pouvant contenir jusqu'à 1,8 kg d'hydrogène à 350 bars de pression est inséré dans le plancher du véhicule. Un réseau de conduites permet la détente et la circulation de l'hydrogène. Concernant les dispositifs de sécurité, un TPRD (thermally-activated pressure relief device) de type « glass bulb », implanté en tête sortie du réservoir, prévient son éclatement par surpression lorsqu'une température seuil de 110 °C est atteinte dans son environnement immédiat.





Photo 1: capotage disposé sur le réservoir d'hydrogène.

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 [3] : lors de la réalisation de ce test, 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. Une fois le TPRD activé, la pression interne du réservoir est divisée par trois en une dizaine de secondes, illustrant le bon fonctionnement du dispositif de sécurité prévenant la rupture mécanique du réservoir.

Cependant, l'intégration de la pile à combustible et du réservoir d'hydrogène dans le véhicule peut avoir des conséquences sur le fonctionnement des dispositifs de sécurité. Il est par conséquent important d'effectuer un essai sur le produit fini en situation d'incendie. Cela permet, en particulier, d'étudier l'interaction potentielle avec la batterie électrique de traction et son éventuel emballement thermique.

# 1.3 Études, dans la littérature, sur les véhicules intégrant de l'hydrogène

Les études sur les problématiques « hydrogène » sont nombreuses [4]. Elles se focalisent principalement sur le comportement du réservoir à hydrogène et des différents organes de sécurité et concernent parfois les incidents post-crash, fuites et inflammation de ces fuites [4]. Les essais sur les véhicules complets sont relativement rares dans la bibliographie. Les *Japan Automobile Research Institute* (JARI) et *Motor Vehicle Fire Research Institute* (MVFRI) [5] ont montré que la procédure de test sur les réservoirs, même si rigoureuse, n'est pas toujours représentative d'un incendie réel. Ils recommandent que l'évaluation de la sécurité d'un véhicule hydrogène soit complétée par un test d'exposition à la flamme directement sur le véhicule afin d'améliorer l'authenticité de l'essai.

Pour la sécurité du public et des premiers intervenants, il convient par conséquent d'étudier le comportement de véhicules contenant un réservoir hydrogène dans des conditions de sollicitations thermiques sévères rencontrées lors d'un incendie mais représentant toujours un scénario réaliste.

#### 1.4 Essai en milieu ouvert

En partenariat avec les SDIS de Loire-Atlantique (44) et de la Vienne (86), Renault, Symbio Fcell et Mouthon formation, le LCPP a étudié en 2014 le comportement au feu d'un système de prolongateur d'autonomie implanté sur un Kangoo ZE. Un premier essai a été réalisé en extérieur sur un site mis à disposition par le SDIS 86 à Valdivienne. Les conclusions de cet essai ont fait l'objet d'un rapport [6]. Il apparaît que :



- la combustion de l'hydrogène en milieu ouvert n'a pas eu d'impact sur la batterie de traction, n'entraînant pas son emballement thermique ;
- en comparant les températures mesurées aux mêmes points, l'essai en situation réelle est légèrement moins sévère que l'essai de certification du réservoir et de son TPRD ;
- le TPRD 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 TPRD;
- lors de l'activation du TPRD, un affaissement du réservoir dans son châssis a été observé, entraînant également les systèmes d'évacuation de la cheminée vers le bas, à l'arrière du véhicule. L'hydrogène contenu dans le réservoir a donc été libéré dans l'espace de chargement et non pas à l'extérieur du véhicule comme prévu initialement. Le dégagement de l'hydrogène dans l'espace de chargement clos (pas de surface vitrée présente à l'arrière du véhicule testé) a limité les effets, sur son environnement, de la combustion de l'hydrogène. Tout rejet de l'hydrogène sous le véhicule pourrait potentiellement impacter directement la batterie de traction; cette solution technique présente cependant l'avantage de rester fonctionnelle en cas de retournement du véhicule sur le toit.
- l'hydrogène utilisé pour cette technologie (prolongateur d'autonomie) ne représente pas une charge calorifique supplémentaire en comparaison des motorisations thermiques classiques : 255 MJ pour l'hydrogène contre environ 1800 MJ pour l'essence ou le diesel. Dans le cas d'un prolongateur d'autonomie, l'énergie contenue dans la batterie doit également être prise en compte mais cette donnée n'est pas aisément accessible et dépend fortement du type de technologie considérée. Cependant, l'énergie contenue dans le réservoir à hydrogène n'est pas libérée selon la même cinétique que les motorisations plus « conventionnelles ». Par conséquent, il conviendra d'intégrer cette cinétique dans toute étude impliquant un véhicule équipé d'un réservoir à hydrogène.

#### 1.5 Essais en milieu semi-confiné

Les recherches bibliographiques n'ont pas permis de trouver de publication dans la littérature scientifique présentant les résultats d'un véhicule, équipé d'un réservoir d'hydrogène, brûlant dans un milieu semi-confiné.

Un véhicule Kangoo ZE, sans prolongateur d'autonomie, avait fait l'objet d'un essai en milieu semi-confiné. Cette expérience fait l'objet d'un rapport [7]. Les conclusions de cette étude montrent que la proximité des véhicules stationnés en parc sous-terrain est de nature à propager un feu d'un véhicule à un autre et d'entretenir ainsi les conditions thermiques susceptibles de provoquer l'emballement thermique des batteries de traction des véhicules électriques. Cependant, la compartimentation des cellules à l'intérieur de la batterie de traction testée font que l'emballement thermique de la batterie a été difficilement différentiable de la combustion des deux véhicules. Il n'a pas été mis en avant, sur cet essai et pour la technologie associée, de risque supplémentaire pour les intervenants et les structures. La batterie représente cependant une charge calorifique spécifique qu'il convient de prendre en compte lors de l'introduction d'un véhicule électrique dans une étude de risque, comme pourrait l'être un réservoir rempli de carburant pour un moteur thermique.



# 2 Objet de l'essai

Sur le retour d'expérience des essais réalisés par le LCPP et ses partenaires ainsi que ceux disponibles dans la littérature scientifique, il a été décidé de réaliser un nouveau test afin d'évaluer le comportement d'un véhicule électrique soumis à un incendie en milieu semi-confiné lorsqu'il est équipé d'un réservoir d'hydrogène alimentant une pile à combustible (système prolongateur d'autonomie de Symbio FCell).

Il a été recherché, lors de cet essai, l'existence de tout phénomène présentant un risque pour les intervenants sapeurs-pompiers ou étant de nature à modifier leur protocole d'intervention.

Les conclusions du présent rapport ne se rapportent cependant qu'à la description des phénomènes physiques observés ainsi que des niveaux thermiques atteints lors de l'essai.

Il est également important de noter que les conclusions de l'étude ne sont représentatives que de cette configuration. Il ne peut être question de généraliser ces résultats à des configurations ou technologies différentes.

### 3 Modification de la zone de rejet d'hydrogène

Une évolution du système de rejet d'hydrogène en sortie de TPRD a été implantée sur le prolongateur d'autonomie par rapport à celui testé en extérieur. En effet, en cas d'activation du TPRD, l'hydrogène contenu dans le réservoir ne s'évacue plus par une cheminée implantée sur le toit mais directement sous le véhicule par une canule orientée de 15° vers l'arrière de la voiture. La zone de rejet étant maintenant placée sur l'axe de symétrie du véhicule, une rotation de 180° du réservoir a été nécessaire afin d'implanter le système TPRD en position centrale et non plus du côté de la porte latérale de l'espace de chargement comme dans la version précédente.

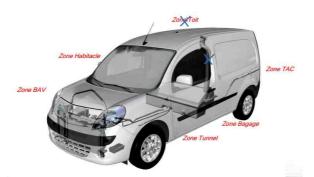


Photo 2: modification de l'implantation de la zone de rejet de l'hydrogène.



Photo 3: implantation de la canule de rejet de l'hydrogène sous le véhicule électrique.

# 4 Site expérimental

Le site d'essai était situé sur l'ancienne Caserne Mellinet, rue du Général Buat, à Nantes. L'utilisation de ce site fait l'objet d'une convention établie entre le SDIS 44 et Nantes Métropole.



Le bâtiment 78 a été utilisé pour la présente expérimentation (voir illustration 1). Il s'agit d'un bâtiment élevé en R+1 anciennement utilisé comme atelier.

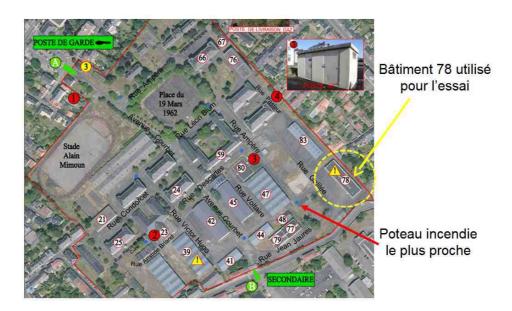


Illustration 1: plan général du site de la Caserne Mellinet.

Bâti en structure mixte métal/béton, il a une surface au sol de 60 x 15 m². Au rez-dechaussée se trouvent trois boxes dont un a servi à accueillir deux véhicules pour l'essai et un second à abriter une partie du matériel d'acquisition.

Le PC mesures du LCPP a été installé dans son camion stationné à une vingtaine de mètres du bâtiment 78.

# 5 Conditions d'essai, aménagement, foyer et ventilation

## 5.1 Aménagement du local d'essai

Le box utilisé pour l'essai mesurait 6 m de longueur pour 5 m de largeur et une hauteur sous plafond de 2,8 m. Il disposait de deux fenêtres donnant sur l'avant du bâtiment. Ces fenêtres avaient été obstruées par le SDIS 44 avant la réalisation de l'essai par des matériaux incombustibles de type « ciporex ».

L'imposte au-dessus de la porte d'accès du box, mesurant 60 cm, a été utile pour constituer un réservoir de fumées et ainsi garder une partie de l'énergie dégagée par l'incendie à l'intérieur du local d'essai. Cela a également permis de se rapprocher d'une configuration « parc de stationnement » dans lesquels des écrans de cantonnement facilitent l'accumulation d'une partie des gaz dégagés.

Afin d'évacuer les fumées hors du bâtiment 78, la totalité des exutoires (de type skydôme) du hangar avait été ouverte par le SDIS 44.





Photo 4: vue extérieure du bâtiment 78.



Photo 5: vue intérieure du bâtiment 78.



Photo 6: fenêtres obstruées.



Photo 7: local d'essai avant obstruction des fenêtres.

# 5.2 Foyer

Deux véhicules avaient été stationnés en marche arrière dans le local d'essai. Celui situé sur la droite du local était le Kangoo ZE-H<sub>2</sub>, à 30 cm de la paroi latérale et 60 cm du mur de fond. Sa batterie de traction de 400 V était entièrement chargée afin de voir si l'emballement thermique de la batterie pouvait être atteint dans cette configuration expérimentale. Son réservoir contenait de l'hydrogène sous une pression de 329 bar.

Un second véhicule fourni par le SDIS 44 avait également été stationné en marche arrière, séparé de 50 cm du Kangoo ZE-H<sub>2</sub>. Il s'agissait d'une Renault Laguna (première génération). Le réservoir de ce second véhicule était rempli d'environ 20 l d'essence afin de créer une configuration d'essai au plus proche des conditions réelles d'utilisation.

Pour permettre la ventilation du foyer et favoriser la propagation d'un véhicule à l'autre, la fenêtre côté passager du Kangoo ZE-H<sub>2</sub> et la fenêtre côté conducteur de la seconde voiture étaient en position ouverte au début de l'essai. La porte arrière de l'espace de chargement du Kangoo avait été maintenue en position fermée dès le début de l'essai.



Afin de se rapprocher des conditions d'utilisation du véhicule utilitaire, des cartons et plusieurs palettes de bois avaient été disposés sur le siège passager ainsi que dans l'espace de chargement arrière du VE.



Photo 8: implantation des véhicules dans le local d'essai.

#### 5.3 Ventilation

La ventilation naturelle du foyer s'est effectuée par la porte d'accès au local, de 2 mètres de large. Aucune modification de cette ventilation n'a été réalisée au cours de l'essai.

#### 5.4 Scénario d'essai

Le véhicule Kangoo a été maintenu en position parking lors de l'essai afin de simuler un incendie suite à une défaillance ou une mise de feu délibérée dans l'habitacle. 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'était pas installée sur le véhicule testé.

La mise de feu a été réalisée sur le siège passager du Kangoo à l'aide d'une charge pyrotechnique.

Aucune extinction n'a été demandée avant l'emballement de la batterie.

# 6 Moyens de mesure, d'acquisition et d'enregistrement vidéo

#### 6.1 Introduction

Tous les équipements de mesure et d'acquisition font l'objet d'une vérification avant et après essais selon les normes et protocoles *ad hoc* afin de satisfaire au système qualité du laboratoire.

#### 6.2 Températures dans le local d'essai

Deux arbres à thermocouples (ATC 1 et ATC 2) ont été implantés dans le local d'essai (voir cercles rouges sur l'illustration 2). Sur chaque arbre, un thermocouple a été disposé tous les 40 cm. Les arbres étaient constitués d'une chaîne métallique fixée au plafond à l'aide



d'une cheville béton ; chaque chaîne était maintenue tendue à l'aide d'un poids attaché à son extrémité.

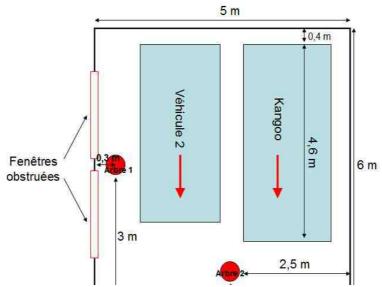


Illustration 2: implantation des arbres de thermocouples dans le local (cercles rouges).

Six thermocouples ont également été placés sous le véhicule d'essai afin de mesurer les températures en sortie de canule d'échappement de l'hydrogène en cas de déclenchement du TPRD. Leur emplacement est précisé sur l'illustration 3 ; ils étaient espacés de 35 cm.

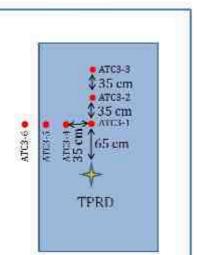


Illustration 3: implantation des thermocouples en sortie de canule échappement de l'hydrogène.

Des thermocouples de type K de 1,5 mm gainés en inconel ont été utilisés pour ces points de mesure.



Coordonnées	X(m)	Y (m)	Z (m)
ATC 1 (arbre à TC)	0,3	3,0	Voir ci-après
ATC 2 (arbre à TC)	2,5	0,5	Voir ci-après

	N°TC	Z(m)
	ATCx-1	0,4
Arbre	ATCx-2	0,8
à	ATCx-3	1,2
thermocouples	ATCx-4	1,6
	ATCx-5	2,0
	ATCx-6	2,4

#### 6.3 Flux thermique incident

Deux fluxmètres ont été installés dans le local à côté de l'arbre à thermocouples ATC 2. La surface sensible du premier (FL1) a été dirigée vers le rejet d'hydrogène et celle du second orienté vers le plafond (FL2).

Ces fluxmètres totaux, du type gradient tangentiel, ont été refroidis par circulation d'eau et isolés thermiquement à l'aide de coque en laine de roche. Le système de refroidissement (pompe & réserve d'eau) a été installé dans un box à proximité.

Coordonnées	X (m)	Y (m)	Z (m)
FL1 (Fluxmètre total)	3,8	0,5	0,25
FL2 (Fluxmètre total)	3,8	0,5	0,4

#### 6.4 Mesure différentielle de pression

Une mesure différentielle de pression a été réalisée entre l'intérieur du local d'essai (à 1,80 m de hauteur) et l'intérieur du hangar. Un thermocouple a été associé au point de mesure de pression à l'intérieur du local d'essai.

Coordonnées	X (m)	Y (m)	Z(m)
P-diff (Pression différentielle)	4,0	0,5	1,8
TC-Pdiff	4,0	0,5	1,8

# 6.5 Températures sur le système prolongateur d'autonomie et le véhicule Kangoo

Six thermocouples ont été installés sur le Kangoo afin de suivre le comportement du prolongateur d'autonomie lors de l'essai :

- au niveau du TPRD, en s'assurant cependant qu'il n'y ait qu'un contact minimal entre le TPRD et le thermocouple (TC-K1 et TC-B1);
- dans la zone tunnel, à proximité de la canule de rejet TPRD (TC-K2);
- dans l'habitacle à mi-hauteur entre les deux sièges (TC-K3);
- au centre de l'espace de chargement (TC-K4);



• sous le capot, au contact du réservoir d'hydrogène (TC-K5 côté TPRD et TC-K6 côté conducteur).

#### 6.6 Températures sur la batterie de traction 400 V

Trois thermocouples ont été installés afin de suivre le comportement de la batterie de traction : au niveau de la connectique (TC-B2), entre le carter de la batterie et le châssis du véhicule (TC-B3) et sur le dessous en face arrière de la batterie (TC-B4).

#### 6.7 Mesure de pression du réservoir à hydrogène

La pression dans le réservoir à hydrogène a été mesurée par *Mouthon formation* grâce à un capteur de pression directement implanté sur le réservoir d'hydrogène à l'opposé du TPRD.

#### 6.8 Vidéos

Deux caméras « type IP » reliées à un enregistreur ont été implantées :

- sur le sol, face au local d'essai afin d'enregistrer le développement du feu sur les deux véhicules (IP1);
- dans le hangar, à 5 m de la porte d'accès au local d'essai, afin d'enregistrer les fumées s'échappant de la zone d'essai (IP2);

Ces moyens vidéo ont été doublés d'une caméra « type GoPro » grand angle cadrant le développement du feu par la porte d'accès au local.

#### 7 Essais

#### 7.1 Conditions initiales dans le local

Quelques minutes avant l'allumage, les conditions ambiantes ont été mesurées dans le local d'essai à l'aide d'un thermo-baro-hygromètre.

Température	13,5 °C
Humidité	97 %
Pression	1024 hPa

#### 7.2 Déroulement

Une synthèse de l'analyse vidéo est présentée ci-après. L'ensemble de l'analyse est disponible en annexe.





t<sub>0</sub>: allumage piloté à distance



t<sub>0</sub>+5 s :développement rapide du feu dans l'habitacle du véhicule électrique (VE) favorisé par la forte charge pyrotechnique disposée sur le siège passager. Les flammes sortent par la fenêtre « passager », en position ouverte dès le début de l'essai.



t<sub>0</sub> + 20 s : un plafond de fumées se forme rapidement dans le local. Dans cette phase d'allumage, ces fumées sont très claires.







 $t_0 + 45~{\rm s}$  : les flammes sortent largement par la fenêtre passager et lèchent le plafond de l'habitacle du VE.

Les fumées s'accumulant en partie haute du local se densifient.



DD-925-MD<sub>44</sub>

BZ-831

DD-925-MD<sub>44</sub>

RANGOO ZEH2

 $t_0 + 2 \, min \, 15 \, s$ : les flammes progressent dans l'habitacle vers la zone conducteur et commencent à sortir par le haut du parebrise commençant à rompre sous l'attaque thermique.







t<sub>0</sub> + 3 min 34 s : bris de la vitre côté conducteur du VE.







t<sub>0</sub>+ 7 min 00 s : la taille des flammes s'échappant par la fenêtre du VE côté passager semble décroître. Elles sortent maintenant de façon privilégiée par le parebrise.

La quantité de gaz de pyrolyse s'échappant par la fenêtre du VT augmente.

Le développement du foyer semble atteindre un palier.

Des gouttes enflammées tombent depuis le rétroviseur du VE côté passager.





 $t_0 + 15 \ \text{min} \ 00 \ s$ : deux explosions au niveau de la roue avant côté passager du VE (pneu puis amortisseur) ont pour conséquence une expansion ponctuelle de la « surface de flamme » puis une propagation du feu vers le VT.



 $t_0$ + 18 min 00 s : des flammes commencent à sortir en partie basse du local, par la droite de l'ouverture.

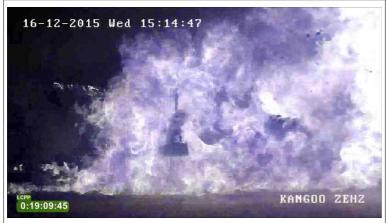


Développement du feu sous le VT par le pneu avant gauche et le pare-chocs.

De nombreuses ré-inflammations d'imbrûlés s'effectuent à partir du coin en haut à droite de l'ouverture.







 $t_0 + 19 \ min \ 09 \ s$  : activation du TPRD. Cela a pour conséquence d'augmenter le « volume de flamme ».

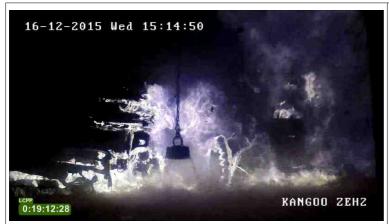




t<sub>0</sub>+ 19 min 10 s : déclenchement du TPRD suivi d'une extinction, pendant quelques secondes, des flammes en avant du local d'essai, d'une diminution nette du régime de combustion, d'une baisse importante du plafond de fumée et d'une densification apparente de ces fumées.







 $t_0 + 19 min\ 12\ s$ : phénomènes suivis d'une re-inflammation des zones préalablement en flamme et d'une augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.





t<sub>0</sub>+ 19 min 15s : la zone de flammes augmente et occupe l'ensemble de la partie haute du volume d'essai. La hauteur des flammes sortant du volume semble cependant se stabiliser.



t<sub>0</sub>+ 19 min 18s : stabilisation du régime de l'incendie.





t<sub>0</sub>+ 19 min 37s : l'intensité du phénomène décroît



 $t_0 + 20 \,$  min 00s : l'intensité de l'incendie semble, en apparence, revenir à son état de développement avant le déclenchement du TPRD. La taille des flammes sortant du local est du même ordre de grandeur mais la surface de matériaux concernés par l'incendie est plus importante à l'intérieur du local.

Des flammes de taille importante s'échappent par la droite de l'ouverte, coté VE.



 $t_0 + 23 \ min \ 00s$  : l'intensité du foyer croît de nouveau.



t<sub>0</sub>+ 24 min 30 s : d'importantes flammes sortent de l'habitacle du VT ainsi que du compartiment moteur du VE.





t<sub>0</sub>+ 29 min : le régime de combustion devient largement sous-ventilé dans le local. Une accélération des gaz en partie basse dans la zone d'amenée d'air est nettement visible.

L'interface entre les flammes s'échappant du local et l'amenée d'air dans ce local se rapproche progressivement du tiers inférieur de l'ouverture.



16-12-2015 Wed 15:29:02 0:33:22:90

 $t_0 + 33 \ min \ 22s$ : la taille des flammes sortant du volume continue d'augmenter.

L'interface entre les flammes s'échappant du local et l'amenée d'air dans ce local continue de se rapprocher du sol. Sur la droite de l'ouverture (côté VE), l'interface se situe à une trentaine de centimètres au-dessus du sol.



t<sub>0</sub>+ 40 min 30 s : le plafond de fumées est remonté d'une quarantaine de centimètres. Des flammes s'échappent de l'habitacle des deux véhicules.





 $t_0 + 45 \ \text{min } 00s$  : l'intensité du feu est sur une phase décroissante.



 $t_0$  + 53 min 01s : intervention SP.



 $t_0 \pm 53$  min 15s : des flammes sont visibles sur le côté conducteur du VE, conséquences de l'emballement thermique de la batterie de traction.



t<sub>0</sub>+ 56 min 00s : feu maîtrisé.





t<sub>0</sub>+ 57 min 26s : fréquentes ré-inflammations entre le VE et la paroi latérale du local. Aucune action SP à distance ne permet d'éviter ces ré-inflammations.

t<sub>0</sub>+ 1h 23min : extinction du feu localisé sur la batterie de traction 400 V. L'accès à la batterie s'est fait par des trous créés par la fonte du carter en aluminium.

#### 8 Résultats

#### Arbres à thermocouples ATC 1 et ATC 2

Les températures mesurées sur les arbres à thermocouples sont tracées dans les graphiques 1 et 2.

Sur la première minute d'essai, une croissance très rapide des températures est constatée en partie haute (au-dessus de 200 cm) pour atteindre des valeurs de l'ordre de 170 °C; ce développement rapide est la conséquence de l'inflammation de la forte charge pyrotechnique disposée sur le siège passager du véhicule électrique (VE). En dessous de 160 cm, les températures restent proches de l'ambiante (35 °C), comportement caractéristique d'une stratification des fumées dans le local d'essai.

Trois minutes après l'allumage, une nouvelle augmentation rapide des températures en partie haute du local est constatée pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 430 °C; elle est la conséquence du bris thermique du pare-brise avant et de la fenêtre conducteur du VE, favorisant ainsi une meilleure ventilation du foyer et le développement de ce dernier.

Les températures se stabilisent ensuite jusqu'à quinze minutes d'essai environ autour de 320 °C en partie haute. Il se produit alors la propagation du feu vers le véhicule thermique (VT) suite à l'inflammation, au moment de l'explosion du pneu avant côté passager du VE, des matériaux combustibles fortement préchauffés et pyrolysant depuis une douzaine de minutes.

Suite à cette propagation au second véhicule, la quantité de fumée produite augmente, entraînant au niveau de l'arbre ATC 1 une diminution de la hauteur libre de fumée en dessous 120 cm autour de 16 minutes et sous 80 cm vers 18 minutes d'essai. La phase pendant laquelle l'incendie se développe rapidement au VT peut être assimilée à un embrasement généralisé. Pendant cette phase, les températures en partie basse du local augmentent plus rapidement sur l'arbre ATC 2 (en entrée du local) que sur l'arbre ATC 1. Cela est la conséquence de la proximité de l'arbre ATC 2 avec les matériaux combustibles situés à l'avant des véhicules (pare-chocs et pneus notamment) dont les flammes issues de leur combustion impactent plus directement les thermocouples. Les flammes commencent à sortir en partie haute du local pendant cette phase de développement de l'incendie, entre 15 et 19



minutes d'essai ; la température en entrée de local, en partie haute est alors de l'ordre de  $800\,^{\circ}\mathrm{C}$ 

C'est après 19 min 09 s d'essai que le TPRD s'active. Cela se traduit, sur les arbres à thermocouples, par une augmentation très rapide des températures en partie basse du local et une homogénéisation de ces températures sur toute la hauteur du local d'essai. Pendant une minute, les températures ont ensuite tendance à décroître, conséquence vraisemblable de la surpression à l'intérieur du local créée par le dégazage du réservoir et ayant pour effet de repousser la zone de combustion vers l'avant et l'extérieur du local d'essai.

Une minute environ après l'activation du TPRD, les températures dans le local augmentent à nouveau en partie haute principalement, conséquence du développement de l'incendie à l'ensemble du local ; plusieurs paliers sont visibles sur les graphiques 1 et 2, entre 20 et 33 minutes d'essai, dépendant des différentes phases de développement du feu sur le VT. L'augmentation des températures est également due à une combustion du monoxyde de carbone dégagé par la combustion sous-ventilée des véhicules ainsi qu'à l'accumulation de chaleur dans les parois du local d'essai et une augmentation de l'attaque thermique sur les matériaux combustibles. Des températures maximales de l'ordre de 1150 °C sont mesurées en partie haute du local.

Trente-trois minutes après l'allumage, l'intensité de l'incendie commence à décroître comme cela est visible sur les températures mesurées au niveau des deux arbres à thermocouples.

Après 53 minutes d'essai, l'extinction par les sapeurs-pompiers débute. Les températures perdent rapidement une centaine de degrés en partie haute (de 520 °C à 410 °C sur l'arbre ATC 1). Trois minutes plus tard, le feu est maîtrisé mais les températures en partie haute oscillent entre 200 °C et 300 °C à cause des flammes s'échappant du pack batterie suite à l'emballement thermique de ce dernier.

#### Thermocouples à proximité de la canule d'échappement de l'hydrogène

Les températures mesurées dans l'axe de la canule d'échappement de l'hydrogène sous le VE sont tracées dans le graphique 3. Ces températures restent relativement faibles sur les quinze premières minutes d'essai (autour de 20 °C) et ne commencent à augmenter, très légèrement, que lorsque le feu se développe vers le VT.

Au moment du déclenchement du TPRD, les températures dans l'axe passent subitement de 45 °C à près de 670 °C. Au contraire des températures mesurées sur les arbres ATC 1 et 2, les températures croissent après le déclenchement du TPRD pour atteindre un maximum de 900 °C une minute plus tard. La pression dans le réservoir diminuant progressivement, la zone de combustion de l'hydrogène revient progressivement vers son point d'expulsion, la canule d'échappement sous le VE. Lorsque l'ensemble de l'hydrogène est purgé, les températures sous le VE diminuent jusqu'à atteindre des valeurs comprises entre 250 °C et 300 °C avant de croître à nouveau avec le développement de l'incendie à l'ensemble du local d'essai.

Les mêmes constats que ceux mentionnés dans le paragraphe précédent peuvent être effectués aux points latéraux de mesure en sortie de canule d'échappement de l'hydrogène. Les températures maximales mesurées lors du dégazage du réservoir d'hydrogène sont cependant légèrement supérieures (1000 °C au point ATC 3-4 – voir le graphique 4).

#### Thermocouples dans l'environnement proche du réservoir d'hydrogène

Les températures enregistrées lors de l'essai sur le réservoir d'hydrogène et autour sont tracées dans le graphique 5. Le déclenchement du TPRD n'a aucune conséquence sur les



températures mesurées dans l'espace de chargement à l'arrière du VE où le réservoir d'hydrogène est implanté ; les températures restent de l'ordre de 650 °C. Les valeurs mesurées sur le réservoir sont très nettement inférieures à la température ambiante dans cette zone du véhicule : 180 °C côté TPRD et 150 °C côté carrosserie. Le capot supérieur de protection de la baignoire où le réservoir d'hydrogène est implanté se révèle être efficace pour retarder l'attaque thermique. Le thermocouple disposé contre le TPRD mesure 260 °C lorsque ce dernier se déclenche ; il semble ainsi que l'organe de sécurité ait une inertie thermique notable. Après dégazage complet de l'hydrogène contenu dans le réservoir, les températures suivent approximativement celles mesurées au niveau des deux arbres à thermocouples.

#### Thermocouples dans le véhicule électrique

Les températures mesurées dans l'habitacle et l'espace de chargement du VE sont tracées dans le graphique 6. À l'avant, à cause de la forte charge pyrotechnique utilisée pour l'allumage, les valeurs augmentent très rapidement sur la première minute pour atteindre près de 550 °C. Lorsque le pare-brise et la fenêtre côté conducteur cèdent, la température dans l'habitacle augmente à nouveau jusqu'à atteindre un maximum de 900 °C. Il est intéressant de noter que, bien que l'habitacle avant soit séparé de l'espace de chargement par une paroi métallique, les températures à l'arrière du véhicule augmentent rapidement pour osciller autour de 600 °C. Au déclenchement du TPRD, la température diminue de 200 °C dans l'habitacle, et se stabilise autour de 600 °C, conséquence du déplacement de la zone de combustion principale vers l'avant du local d'essai. Les températures restent ensuite proches de cette valeur pendant une dizaine de minute environ et augmentent ensuite lorsque le feu se développe vers le VT.

#### Thermocouples dans l'environnement de la batterie de traction

Les températures mesurées autour de la batterie de traction du VE sont tracées dans le graphique 7. Elles restent inférieures à 65 °C jusqu'au déclenchement du TPRD. Les points de mesure sur la face externe sous le véhicule et au niveau de la connectique augmentent alors très rapidement et atteignent 1000 °C. Elles diminuent ensuite en trois minutes jusqu'à environ 200 °C, valeur autour de laquelle elles se stabilisent. Au déclenchement du TPRD, la température entre le plancher du VE et le carter de batterie augmentent plus lentement. Ce n'est que cinq minute après le déclenchement que la valeur maximale est enregistrée en ce point (600 °C). Vers 45 min d'essai, une divergence est constatée entre la température mesurée en face externe de la batterie et celle sur la connectique. Cette dernière augmente de 500 °C en moins de trois minutes. Il est envisagé que cette rapide croissance soit un indicateur d'amorce de l'emballement thermique de la batterie, d'autant plus que l'incendie est dans une phase de décroissance sur cette période et que l'emballement effectif est constaté quelques minutes plus tard sur les enregistrements vidéos par le dégagement de flammes par une face de la batterie, côté conducteur.

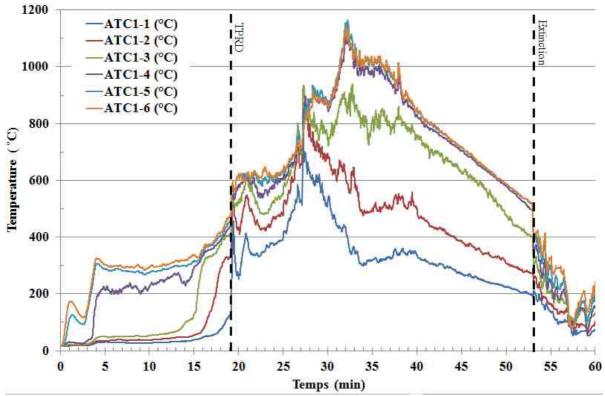
#### Flux thermiques incidents

Les flux thermiques incidents mesurés en deux points sont tracés dans le graphique 8. Le fluxmètre orienté vers le plafond mesure des valeurs proches de 5 kW/m² sur les quinze premières minutes d'essai. Le capteur orienté verticalement ne commence à mesurer des valeurs significatives que lorsque le foyer se propage au VT et que le pare-chocs du VE tombe au sol. Les flux incidents augmentent très rapidement à partir de 15 min d'essai et l'occurrence de l'embrasement généralisé; elles croissent alors de 5 kW/m² à plus de 80 kW/m². Le déclenchement du TPRD n'est pas visible sur ces mesures du fait de la saturation du capteur. Les valeurs maximales mesurées sont de l'ordre de ce qui est communément mentionné dans la littérature pour une situation post flash-over.



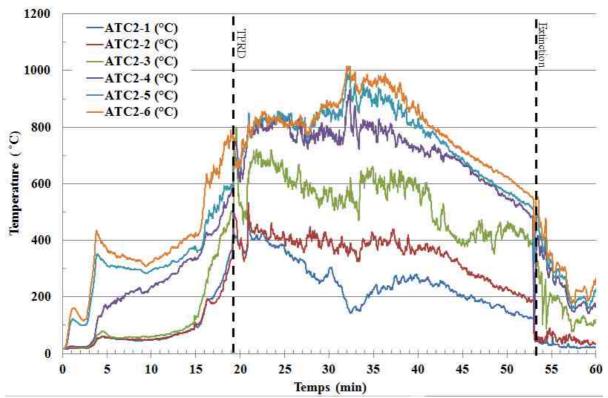
#### Pression dans le réservoir d'hydrogène

Enfin, la pression dans le réservoir d'hydrogène est tracée dans le graphique 8. Il apparaît que cette pression commence à augmenter à partir de 8 minutes d'essai, peu de temps après que les deux thermocouples placés sur le réservoir enregistrent une hausse. La pression interne continue de croître jusqu'à atteindre une valeur maximale de 377 bar au moment de l'activation (thermique) du TPRD. Cela correspond à une augmentation de 47 bar par rapport au début d'essai. La pression chute ensuite jusqu'à 50 bar en moins de trente secondes et le temps de purge est évalué à 1 min 22s.

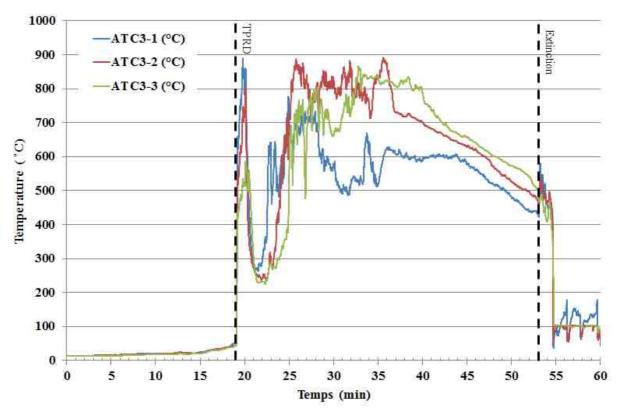


Graphique 1: températures sur l'arbre à thermocouples ATC1.



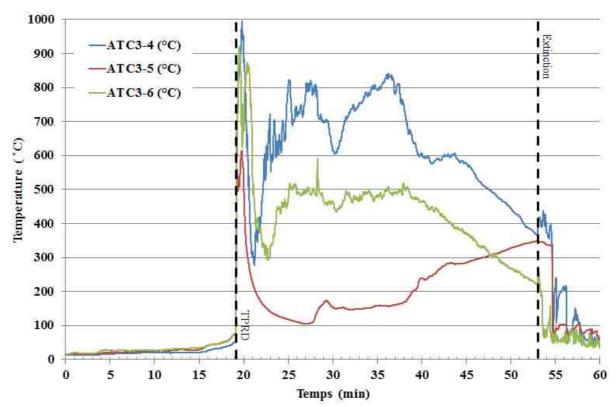


Graphique 2: températures sur l'arbre à thermocouples ATC2.

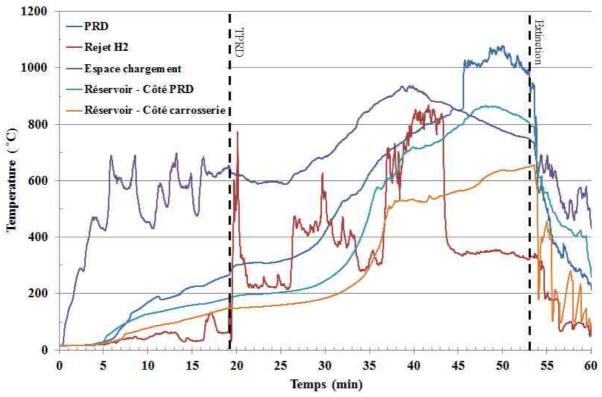


Graphique 3: températures longitudinales en sortie de canule échappement de l'hydrogène.



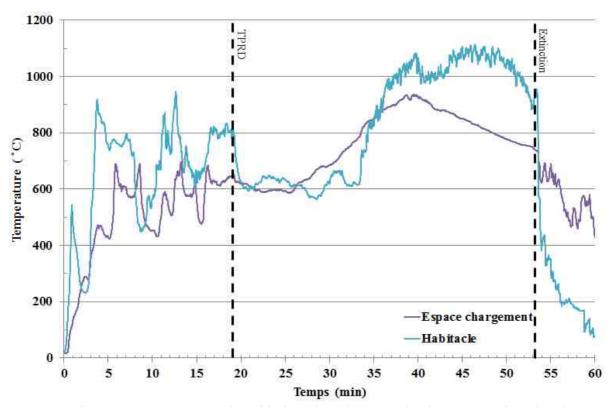


Graphique 4: températures latérales en sortie de canule échappement de l'hydrogène.

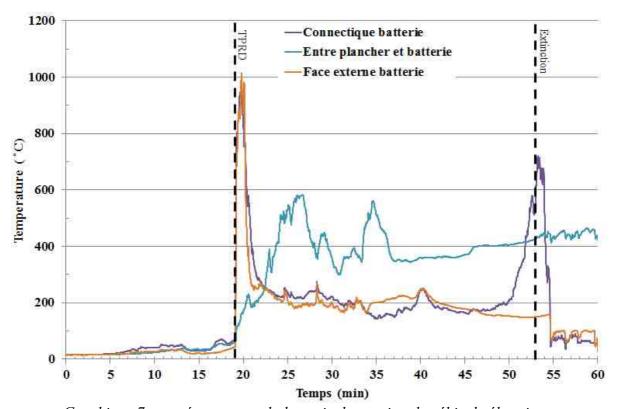


Graphique 5: températures sur des organes du prolongateur d'autonomie et dans l'espace de chargement.



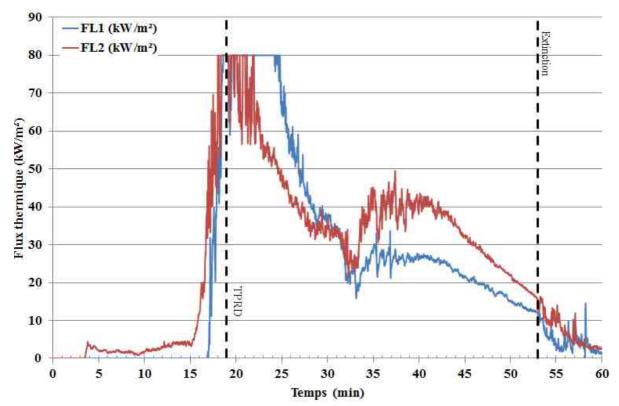


Graphique 6: températures dans l'habitacle et l'espace de chargement du véhicule électrique.

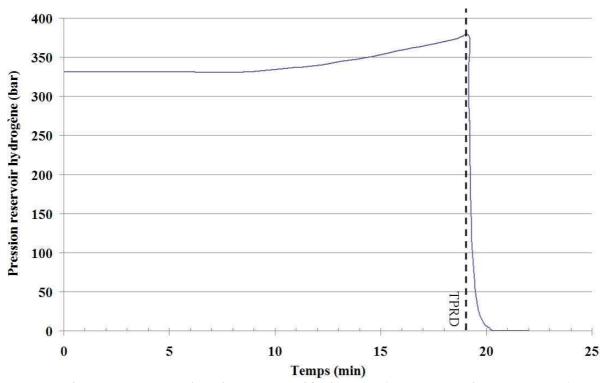


Graphique 7: températures sur la batterie de traction du véhicule électrique.





Graphique 8: flux thermiques incidents dans le local d'essai.



Graphique 9: pression dans le réservoir d'hydrogène (mesure Mouthon Formation).



#### 9 Conclusion

Un essai a été réalisé en milieu semi-confiné afin d'étudier le comportement d'un véhicule électrique soumis à un incendie lorsqu'il est équipé d'un réservoir d'hydrogène alimentant une pile à combustible. Il s'agit d'un véhicule Renault Kangoo ZE équipé d'un prolongateur d'autonomie développé par Symbio Fcell. Au début de l'essai, la batterie de traction du véhicule électrique était chargée à 100 % et la pression dans le réservoir d'hydrogène était de 329 bar.

Il a été recherché, lors de cet essai, la mise en évidence de tout phénomène présentant un risque pour les intervenants sapeurs-pompiers ou étant de nature à devoir faire évoluer leur protocole d'intervention.

À ce stade, il est rappelé que les conclusions de l'étude ne sont représentatives que de cette configuration. Il ne peut être question de généraliser les résultats à des configurations ou technologies différentes.

La mise de feu a été réalisée sur le siège passager du véhicule électrique à l'aide d'une forte charge pyrotechnique induisant un développement rapide du foyer sur les premières minutes d'essai.

La propagation du foyer depuis le véhicule électrique vers le véhicule thermique s'est effectuée après 15 minutes d'essai.

L'activation de l'organe de sécurité évitant l'éclatement du réservoir d'hydrogène par suppression (type TPRD se déclenchant à 110 °C) a eu lieu après 19 min 09 s d'essai, lorsque la température dans l'espace de chargement où il est implanté était de l'ordre de 620 °C. Celles mesurées sur le réservoir avoisinaient 180 °C côté TPRD et 150 °C côté carrosserie. Cette activation du TPRD a eu pour effet immédiat de faire décroître la pression dans le réservoir de 377 bar à 50 bar en moins de trente secondes. La purge totale du réservoir s'est effectuée en 1 min 22 s.

La libération de l'hydrogène a eu pour conséquence de « souffler » les flammes dans le local sur la première seconde suivant le déclenchement du TPRD, rapidement suivi par une re-inflammation des véhicules et de l'hydrogène dégagé. Une flamme de plus de 4,5 m de haut s'est alors établie en sortie du local d'essai pendant 30 s environ, avant que la taille de cette flamme décroisse progressivement jusqu'à la purge totale de l'hydrogène. Lors de la purge de l'hydrogène, des températures de l'ordre de 1000 °C ont été mesurées en sortie de canule sous le véhicule et 800 °C en partie haute du local. Cette dernière valeur, relativement peu élevée pour cette configuration d'essai, pourrait s'expliquer par une surpression générée dans le local par le dégazage de l'hydrogène et une combustion de ce gaz ainsi que des gaz de pyrolyse se réalisant principalement à l'extérieur du local d'essai. La majorité du dégagement d'énergie s'est alors effectuée dans le hangar d'essai, non instrumenté.

L'activation du TPRD et la combustion de l'hydrogène en résultant, n'a pas déclenché, dans cette configuration d'essai, l'emballement thermique de la batterie de traction.

Le développement de l'incendie s'est alors poursuivi, vraisemblablement accéléré par l'énergie dégagée lors de la combustion de l'hydrogène ayant chauffé les matériaux et le local

Lorsque l'incendie était pleinement développé dans le local et que les deux véhicules dégageaient de l'énergie, une température de 1150 °C a été atteinte en partie haute du volume.

Trente-trois minutes après l'allumage, l'intensité de l'incendie a commencé à décroître, faute de combustible.



Au moment de l'intervention des sapeurs-pompiers pour procéder à l'extinction de l'incendie, 53 minutes après l'allumage, une flamme s'échappant du pack batterie entre le véhicule électrique et la paroi latérale est apparue, conséquence de l'inflammation des gaz générés par l'emballement thermique de la batterie de traction. Cette flamme a été intermittente. Durant cette phase de l'incendie, les températures mesurées sous plafond en entrée du local d'essai ont oscillé d'une centaine de degrés à chaque apparition de la flamme. Ce véhicule ne disposant pas de trappe thermofusible comme d'autres modèles (Fireman access de la ZOE) de la même marque, aucune action des sapeurs-pompiers n'a permis l'extinction rapide du feu de batterie. L'extinction du foyer localisé sur la batterie 400 V a toutefois été réalisé 1 h 23 min après la mise de feu, soit 30 minutes après l'emballement thermique. Le refroidissement de la batterie a été effectué par l'insertion d'eau par les trous dans le carter en aluminium, fondu par endroit à cause de la sollicitation thermique de l'incendie. La recherche et l'accès à ces trous ont été rendus difficile par le confinement dans le local d'essai du véhicule étudié.

Aucun signe annonciateur du déclenchement du TPRD et de l'emballement thermique de la batterie facilement exploitable par les services de secours n'a pu être mis en évidence par l'analyse des images vidéos ou des courbes de température ou de flux thermique.

Lors de la purge du réservoir d'hydrogène, une flamme de 4,5 m est sortie par l'ouverture du local d'essai. Cette hauteur (ou longueur) de flamme est directement dépendante de la pression dans le réservoir mais également du diamètre de la canule d'échappement de l'hydrogène en sortie du réservoir. Une réflexion pourrait être menée pour trouver le meilleur compromis entre le temps de purge et l'augmentation de pression dans le réservoir afin de diminuer cette taille de flamme tout en excluant toute rupture mécanique du réservoir.

Enfin, il est difficile d'extrapoler la longueur de flamme à une configuration de parc de stationnement où le local d'essai ne déboucherait pas sur un hangar ayant une hauteur de plafond de plus de 15 m mais sur un volume ayant la même hauteur sous plafond que le local d'essai.

# 10 Bibliographie

- [1] FISCHER M. 1986, Safety Aspects of Hydrogen Combustion in Hydrogen Energy Systems. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 11(9):593-601.
- [2] RINGLAND J. T. 1994, Safety Issues for Hydrogen-Powered Vehicles. SANDIA Report SAND94-8226.
- [3] Regulation (EC) n° 79/2009 of the European Parliament and of the Council 2009, Type-approval of hydrogen-powered motor vehicles and amending directive 2007/46/EC.
- [4] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION 2010, *Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research*, DOT HS 811 267.
- [5] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION 2013, Postcrash Hydrogen Leakage Limits and Fire Safety Research, DOT HS 811 816.
- [6] LABORATOIRE CENTRAL DE LA PRÉFECTURE DE POLICE 2015, Évaluation du comportement d'un véhicule HyKangoo ZE en situation d'incendie en milieu non-confiné, 14/7628.



[7] LABORATOIRE CENTRAL DE LA PRÉFECTURE DE POLICE 2013, Étude d'un feu de véhicule électrique stationné à proximité d'un véhicule thermique dans une structure béton, 13/6836.



# 11 Annexe 1 – Analyses vidéo

# 11.1 Analyse de l'enregistrement vidéo IP1



t<sub>0</sub>: allumage piloté à distance



t<sub>0</sub>+ 5 s :développement rapide dans l'habitacle du véhicule électrique (VE) favorisé par la forte charge pyrotechnique disposée sur le siège passager. Les flammes sortent par la fenêtre passager, en position ouverte dès le début de l'essai.



 $t_0 + 45~s$  : les flammes sortent largement par la fenêtre passager et lèchent le plafond de l'habitacle du VE.





 $t_0+1$  min 00 s : des volutes de fumées sortent par le bas de porte.



 $t_0 + 1 \ min \ 06 \ s$ : bris thermique du pare-brise qui reste cependant en position mais devient progressivement perméable aux fumées et aux flammes.



t<sub>0</sub>+ 2 min 15 s : les flammes progressent dans l'habitacle vers la zone conducteur.



t<sub>0</sub>+ 3 min 00 s : le pare-brise du VE continue de céder progressivement favorisant ainsi la ventilation du foyer dans l'habitacle. Le rétroviseur côté passager du véhicule thermique (VT) commence à pyrolyser.





t<sub>0</sub>+3 min 34 s : bris de la vitre côté conducteur du VE.



t<sub>0</sub>+ 4 min 00 s : le foyer continue de se développer dans l'habitacle du VE, endommageant le rétroviseur côté passager. Conséquence de l'augmentation de l'ambiance thermique et du rayonnement dans le volume d'essai, la production de gaz de pyrolyse augmente légèrement autour du rétroviseur et de la fenêtre conducteur du VT.



 $t_0 + 5 \ min \ 10 \ s$  : les rétroviseurs du VE gouttent enflammés.



t<sub>0</sub>+ 7 min 00 s : la taille des flammes s'échappant par la fenêtre du VE côté passager semble décroître.





 $t_0 + 10 \ min \ 00 \ s$ : le développement dans l'habitacle du VE semble avoir atteint un palier.

Des gouttes enflammées de polymère coulent depuis le passage de roue vers le pneu avant côté passager du VE.

Une très légère augmentation de la quantité de gaz de pyrolyse émise par la fenêtre du VT est visible et des morceaux du rétroviseur commencent à tomber au sol.



 $t_0+12 \min 09 \ s$ : projection, à partir de l'habitacle du VE, d'éléments incandescents. Aucune incidence sur le développement du feu n'est observée.



 $t_0 + 13 \ \text{min} \ 00 \ s$ : propagation du feu depuis l'habitacle vers l'avant du VE; l'aile côté passager brûle également et s'affaisse sur la roue avant, la sollicitant directement.

Toujours aucune zone de flamme constatée sur le VT.



t<sub>0</sub>+ 14 min 30 s : le feu s'est maintenant propagé à la roue avant droite du VE.





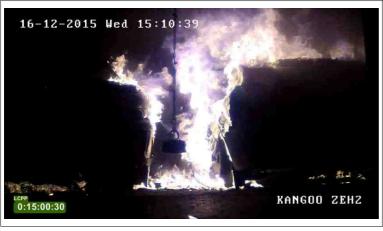
 $t_0+14 \ min \ 38 \ s$ : explosion du pneu avant côté conducteur du VE créant une expansion ponctuelle de la surface de flamme.



 $t_0+14\ min\ 40\ s$ : cette explosion du pneu a eu pour conséquence l'inflammation des gaz de pyrolyse au niveau de l'aile avant conducteur du VT.



t<sub>0</sub>+ 14 min 50 s : très rapidement, une seconde explosion est observée dans la zone avant côté passager du VE. Il s'agit vraisemblablement de la rupture de la suspension avant.



 $t_0 + 15 \ \text{min} \ 00 \ s$ : le feu continue ensuite de se développer vers l'avant du VE, sur le parechocs notamment ainsi que vers l'habitacle du VT.





 $t_0 + 15 \,$  min 43 s : chute du pare-chocs avant du VE et développement plus marqué des flammes localisées sur le compartiment moteur.



 $t_0 + 16 \ \text{min} \ 15 \ \text{s}$ : quart avant côté passager du VE entièrement en feu. L'incendie continue de se développer sur le capot moteur vers le côté conducteur.



t<sub>0</sub>+ 17 min 00 s : chute complète du pare-chocs avant du VE et propagation sur la totalité de son compartiment avant.



t<sub>0</sub>+ 18 min 00 s : des flammes commencent à sortir en partie basse par la droite de l'ouverture du local. Développement du feu sous le VT par le pneu avant gauche et le parechocs.





 $t_0+19\ min\ 09\ s$ : activation du TPRD. Cela a pour conséquence d'augmenter le "volume de flamme" au niveau de la roue avant côté conducteur du VT.



 $t_0+19 \ min\ 10\ s$ : déclenchement du TPRD suivi d'une extinction, pendant quelques secondes, des flammes en avant du local d'essai.



t<sub>0</sub>+ 19min 12 s : suivie d'une re-inflammation des zones préalablement en flamme.



 $t_0$ + 19 min 42 s : chute du pare-chocs avant du VT.





 $\begin{vmatrix} t_0 + 20 \text{ min } 52 \text{ s} : \text{ explosion du pneu avant droit } \\ \text{du VT.} \end{vmatrix}$ 



 $t_0$  + 21 min 00 s : le feu est pleinement développé à l'avant du local.



t<sub>0</sub>+ 24 min 30 s : d'importantes flammes sortent de l'habitacle du VT ainsi que du compartiment moteur du VE.



t<sub>0</sub>+ 27 min 00 s : un mouvement de convection plus prononcé apparaît à l'avant du volume, en partie basse. Des fumées ou de la vapeur d'eau semblent être aspirées vers le foyer.





 $t_0+28 \ min \ 00 \ s$ : le plafond de fumée descend dans le volume jusqu'à pratiquement atteindre le dessus du capot du VT.



 $t_0+29\ min\ 00\ s$ : le régime de combustion devient largement sous-ventilé dans le local. L'accélération des gaz en partie basse dans la zone d'amenée d'air est toujours plus visible. Des ré-inflammations du type roll-over sont par moment visibles dans l'épaisse couche de fumée.



 $t_0 + 32 \,$  min 08 s : des lueurs pouvant être assimilées à celles d'une flamme sont visibles dans le coin en haut à droite de l'image. Le plafond de fumée continue de descendre. L'intensité des flammes au premier plan, à l'avant des véhicules, décroît, vraisemblablement par manque de combustible.



 $t_0 + 33 \ \text{min} \ 06 \ s$ : importants mouvements de fumées venant de la droite de l'image, vraisemblablement entre le mur avant et le compartiment moteur du VE.

Des zones de combustion sont visibles en partie haute à l'interface entre la couche de fumée et l'air entraîné.





 $t_0$  + 40 min 30 s : le plafond de fumées est remonté d'une quarantaine de centimètres. Des flammes s'échappent de l'habitacle des deux véhicules.



 $t_0 + 44 min \ 35 \ s$  : endommagement de la camera.



 $t_0$ + 53min 25 s : intervention SP.

## 11.2 Analyse de l'enregistrement vidéo IP2





t<sub>0</sub>: allumage piloté à distance



 $t_0+5~s$ : développement rapide dans l'habitacle du véhicule électrique (VE) favorisé par la forte charge pyrotechnique disposée sur le siège passager. Les flammes sortent par la fenêtre passager, en position ouverte dès le début de l'essai.



t<sub>0</sub>+ 20 s : un plafond de fumées se forme rapidement dans le local. Dans cette phase d'allumage, ces fumées sont très claires.



t<sub>0</sub>+ 45 s : les flammes sortent largement par la fenêtre passager et lèchent le plafond de l'habitacle du VE. Une couche de fumées continue de se former. Celles-ci deviennent plus foncées.





 $t_0+1$  min 22 s : bris thermique du pare-brise qui reste cependant en position mais devient progressivement perméable aux fumées et aux flammes.



 $t_0 + 2 \min 15 \ s$ : les flammes progressent dans l'habitacle vers la zone conducteur et commencent à sortir par le haut du pare-brise.



 $t_0 + 3 \ min \ 00 \ s$ : le pare-brise du VE continue de céder progressivement favorisant ainsi la ventilation du foyer dans l'habitacle.



 $t_0+3$  min 34 s : bris thermique de la vitre côté conducteur du VE. Des gaz de pyrolyse sont nettement visibles au-dessus du rétroviseur du VT.





 $t_0\!+\!4$  min  $00\ s$  : le foyer continue de se développer dans l'habitacle du VE. Le plafond de fumée s'épaissit.



 $t_0 + 4 \ min \ 30s$  : le rétroviseur côté passager du VE goutte enflammé.



t<sub>0</sub>+ 7 min 00s : la quantité de gaz de pyrolyse s'échappant par la fenêtre du VT augmente.

Le développement du foyer semble atteindre un palier.



 $t_0 + 10 \ min \ 20s$  : des gouttes enflammées tombent depuis le passage de roue vers le pneu avant passager du VE.

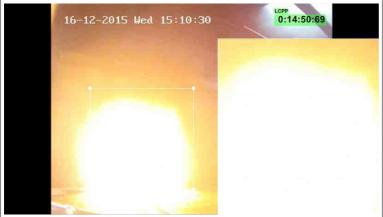




 $t_0 + 13 \ \text{min } 00s$ : nette propagation des flammes vers l'avant du véhicule, son compartiment moteur et son pneu avant côté passager.



 $t_0 + 14 \ min \ 38s$  : explosion à l'avant du VE entraı̂nant l'expansion ponctuelle de la surface de flamme.



 $t_0 + 14 \ min \ 50s$  : explosion rapidement suivie d'une seconde.



 $t_0$ + 15 min 00s : le feu est maintenant développé à l'avant des deux véhicules.



t<sub>0</sub>+ 16 min 22s : des flammes commencent à sortir du volume (inflammation du type rollover à l'interface entre couche de fumée et amenée d'air).



 $t_0 + 18 \min 00s$ : de nombreuses réinflammations d'imbrûlés s'effectuent à partir du coin en haut à droite de l'ouverture.



t<sub>0</sub>+ 19 min 00s : les flammes sortent maintenant en continue à l'extérieur du local, de façon privilégiée du côté du VE.



 $t_0+19 \ min \ 09s$ : légère et subite augmentation du « volume de flamme », vraisemblablement due à l'activation du TPRD.

t<sub>0</sub>+ 19 min 10s : suivie d'une diminution nette du régime de combustion, d'une baisse importante du plafond de fumée et d'une densification apparente de ces fumées.





 $t_0+19 \ min \ 11s$ : phénomènes suivis d'une inflammation des gaz en partie haute depuis l'arrière du volume et progressant vers l'avant.



 $t_0$ + 19 min 11s : augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.



 $t_0 \!+\! 19 \; min \; 11s$  : augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.



 $t_0 + 19 \ min \ 12s$ : augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.





 $t_0 + 19 \ min \ 13s$ : la principale zone de combustion se situe sur la droite du volume, cote VE.

 $t_0 + 19 \ \text{min} \ 15s$ : la zone de flammes augmente et occupe l'ensemble de la partie haute du volume d'essai. La hauteur des flammes sortant du volume semble cependant se stabiliser.



 $t_0 + 19 \ min \ 18s$  : stabilisation du régime de l'incendie.



 $t_0$  + 19 min 37s : l'intensité du phénomène semble décroître.





t<sub>0</sub>+ 19 min 44s : l'intensité de l'incendie continue de décroître.

t<sub>0</sub>+ 20 min 00s : l'intensité de l'incendie semble, en apparence, revenir à son état avant le déclenchement du TPRD. La taille des flammes sortant du local est du même ordre de grandeur mais la surface de matériaux concernés par l'incendie est plus importante à l'intérieur du local.



 $t_0 + 20 \ min \ 51s$ : explosion du pneu avant droit du VT ayant pour conséquence immédiate une augmentation du « volume de flamme ».



 $t_0 + 23 \text{ min } 00\text{s}$  : l'intensité du foyer semble continuer de croître.





 $t_0 + 26 \text{ min } 00s$ : l'eau sur le sol devant le local d'essai s'évapore de plus en plus rapidement et est directement entraînée vers la zone de combustion.

t<sub>0</sub>+ 27 min 15s : la vitesse des flammes et des gaz s'échappant en partie haute du local augmente sensiblement.

La taille de flammes côté VT augmente progressivement, conséquence vraisemblable du développement du sinistre sur ce véhicule.



t<sub>0</sub>+ 29 min 16s : l'interface entre les flammes s'échappant du local et l'amenée d'air dans ce local se rapproche progressivement du tiers inférieur de l'ouverture.



 $t_0+32 \ \text{min} \ 03s$ : augmentation sensible de la taille des flammes s'échappant en partie haute du volume ainsi que de la quantité de fumée produite. Cette dernière est plus dense et sombre.





 $t_0$ + 33 min 22s : la taille des flammes sortant du volume continue d'augmenter.

L'interface entre les flammes s'échappant du local et l'amenée d'air dans ce local continue de se rapprocher du sol. Sur la droite de l'ouverture (côté VE), l'interface se situe à une trentaine de centimètres au-dessus du sol).



t<sub>0</sub>+ 39 min 04s : la hauteur des flammes s'échappant du local a diminué et l'interface entre les flammes et l'amenée d'air est remontée à environ la moitie de l'ouverture.



 $t_0 + 45 \ \text{min} \ 00 \text{s}$  : l'intensité du feu semble être sur une phase décroissante.



 $t_0$  + 53 min 01s : intervention SP.





 $t_0$  + 53 min 15s : des flammes sont visibles sur le côté conducteur du VE, conséquences de l'emballement thermique de la batterie de traction.



t<sub>0</sub>+ 56 min 00s : feu maîtrisé.



 $t_0 + 57 \,$  min 26s : fréquentes ré-inflammations entre le VE et la paroi latérale du local. Aucune action SP à distance ne permet d'éviter ces ré-inflammations.

## 11.3 Analyse de l'enregistrement vidéo GP-LCPP





t<sub>0</sub>: allumage piloté à distance



 $t_0 + 5$  s : développement rapide dans l'habitacle du véhicule électrique (VE) favorisé par la forte charge pyrotechnique disposée sur le siège passager. Les flammes sortent par la fenêtre passager, en position ouverte dès le début de l'essai.



t<sub>0</sub>+ 20 s : un plafond de fumées se forme rapidement dans le local. Dans cette phase d'allumage, ces fumées sont très claires.



t<sub>0</sub>+ 45 s : les flammes sortent largement par la fenêtre passager et lèchent le plafond de l'habitacle du VE. Une couche de fumées continue de se former. Celles-ci deviennent plus foncées.





 $t_0+1$  min 22 s : bris thermique du pare-brise qui reste cependant en position mais devient progressivement perméable aux fumées et aux flammes.



 $t_0 + 2 \ min \ 15 \ s$ : les flammes progressent dans l'habitacle vers la zone conducteur et commencent à sortir par le haut du pare-brise.



 $t_0 \pm 3 \text{ min } 00 \text{ s}$  : le pare-brise du VE continue de céder progressivement favorisant ainsi la ventilation du foyer dans l'habitacle.



t<sub>0</sub>+ 3 min 34 s : des gaz de pyrolyse sont nettement visibles au-dessus du rétroviseur du VT.





 $t_0 + 4 \ min \ 00 \ s$  : le foyer continue de se développer dans l'habitacle du VE. Le plafond de fumée s'épaissit.

 $t_0\!+\!4$  min 30s : le rétroviseur côté passager du VE goutte enflammé.



t<sub>0</sub>+7 min 00s : la quantité de gaz de pyrolyse s'échappant par la fenêtre du VT augmente.

Le développement du foyer semble atteindre un palier.



 $t_0 + 10 \ min \ 25s$  : des gouttes enflammées tombent depuis le passage de roue vers le pneu avant passager du VE.

La couche de fumée se stabilise une dizaine de centimètres au-dessus du toit du VT.





 $t_0+11\ min\ 06s$ : des ré-inflammations de la couche de fumée sont visibles ponctuellement à l'avant du local d'essai, côté VE.



 $t_0 + 13 \; min \; 00s$ : nette propagation des flammes vers l'avant du véhicule, son compartiment moteur et son pneu avant côté passager.

La couche de fumée est descendue d'une dizaine de centimètres.



 $t_0 + 14 \ min \ 38s$  : explosion à l'avant du VE entraı̂nant l'expansion ponctuelle de la surface de flamme.

 $t_0\!+\!14$  min 42s : c'est à la suite de cet événement que le feu se propage au VT avec une inflammation au niveau du rétroviseur, de l'aile et du pneu côté conducteur.

 $t_0$ + 14 min 50s : première explosion rapidement suivie d'une seconde.





 $t_0 + 15 \text{ min } 00\text{s}$  : le feu est maintenant développé à l'avant des deux véhicules.



 $t_0 + 16 \ \text{min} \ 22s$ : des flammes commencent à sortir du volume (inflammation du type rollover à l'interface entre couche de fumée et amenée d'air).



 $t_0 + 18 \ \text{min } 00\text{s}$ : de nombreuses réinflammations d'imbrûlés s'effectuent à partir du coin en haut à droite de l'ouverture.



t<sub>0</sub>+ 19 min 00s : les flammes sortent maintenant en continue à l'extérieur du local, de façon privilégiée du côté du VE.





 $t_0+19\ min\ 09s$ : légère et subite augmentation du « volume de flamme », vraisemblablement due à l'activation du TPRD.



 $t_0+19 \ min \ 10s$ : suivie d'une diminution nette du régime de combustion, d'une baisse importante du plafond de fumée et d'une densification apparente de ces fumées.



 $t_0+19 \ min \ 11s$ : phénomènes suivis d'une inflammation des gaz en partie haute depuis l'arrière du volume et progressant vers l'avant.



 $t_0$ + 19 min 11s : augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.





 $t_0$ + 19 min 11s : augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.



 $t_0$ + 19 min 12s : augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.



t<sub>0</sub>+ 19 min 13s : la principale zone de combustion se situe sur la droite du volume, côté VE.



 $t_0 + 19 \ \text{min } 15 \text{s}$ : la zone de flammes augmente et occupe l'ensemble de la partie haute du volume d'essai. La hauteur des flammes sortant du volume semble cependant se stabiliser.





 $t_0 + 19 \ min \ 18s$  : stabilisation du régime de l'incendie.



 $t_0 + 19 \ min \ 37s$  : l'intensité du phénomène semble décroître.



 $t_0 + 19 \ min \ 44s : l'intensité de l'incendie continue de décroître.$ 



 $t_0 \!+\! 20$  min 00s : l'intensité de l'incendie semble, en apparence, revenir à son état de développement avant le déclenchement du TPRD. La taille des flammes sortant du local est du même ordre de grandeur mais la surface de matériaux concernés par l'incendie est plus importante à l'intérieur du local.

Des flammes de taille importante s'échappent par la droite de l'ouverte, coté VE.





 $t_0 \pm 20~\text{min}~51s$ : explosion du pneu avant droit du VT ayant pour conséquence immédiate une augmentation du « volume de flamme ».



 $t_0 + 23 \ min \ 00s$  : l'intensité du foyer semble continuer de croître.

 $t_0 \! + \! 23 \; min \; 02s$  : arrêt de l'enregistrement vidéo.

## 11.4 Analyse de l'enregistrement vidéo GP-SDIS 44



t<sub>0</sub>: allumage piloté à distance





 $t_0+5~s$ : développement rapide dans l'habitacle du véhicule électrique (VE) favorisé par la forte charge pyrotechnique disposée sur le siège passager. Les flammes sortent par la fenêtre passager, en position ouverte dès le début de l'essai.



 $t_0 + 20 \ s$ : un plafond de fumées se forme rapidement dans le local. Dans cette phase d'allumage, ces fumées sont très claires.



t<sub>0</sub>+ 45 s : les flammes sortent largement par la fenêtre passager et lèchent le plafond de l'habitacle du VE. Une couche de fumées continue de se former. Celles-ci deviennent plus foncées.



 $t_0+1$  min 22 s : bris thermique du pare-brise qui reste cependant en position mais devient progressivement perméable aux fumées et aux flammes.





 $t_0 + 2 \min 15 \text{ s}$ : les flammes progressent dans l'habitacle vers la zone conducteur et commencent à sortir par le haut du pare-brise.



 $t_0 + 3 \min 00 \text{ s}$ : le pare-brise du VE continue de céder progressivement favorisant ainsi la ventilation du foyer dans l'habitacle.



 $t_0\!+\!3$  min 34 s : des gaz de pyrolyse sont nettement visibles au-dessus du rétroviseur du VT.



 $t_0 + 4 \ min \ 00 \ s$  : le foyer continue de se développer dans l'habitacle du VE. Le plafond de fumée s'épaissit.





 $t_0$ + 4 min 30s : le rétroviseur côté passager du VE goutte enflammé.



 $t_0$ + 7 min 00s : la quantité de gaz de pyrolyse s'échappant par la fenêtre du VT augmente.

Le développement du foyer semble atteindre un palier.



t<sub>0</sub>+ 10 min 25s : des gouttes enflammées tombent depuis le passage de roue vers le pneu avant passager du VE.

La couche de fumée se stabilise une dizaine de centimètres au-dessus du toit du VT.



 $t_0 + 13 \ \text{min } 00s$  : la couche de fumée est descendue d'une dizaine de centimètres. Aucune zone de flamme n'est constatée sur le VT.





 $t_0 + 14 \ min \ 38s$  : explosion à l'avant du VE entraı̂nant l'expansion ponctuelle de la surface de flamme.



 $t_0 + 14 \ \text{min} \ 42s$ : c'est à la suite de cet événement que le feu se propage au VT avec une inflammation au niveau du rétroviseur, de l'aile et du pneu côté conducteur.



 $t_0 + 14 \ min \ 50s$  : première explosion rapidement suivie d'une seconde, plus violente.



 $t_0$ + 15 min 00s : le feu est maintenant développé à l'avant des deux véhicules.





 $t_0+16$  min 38s : des flammes commencent à sortir du volume (inflammation du type rollover à l'interface entre couche de fumée et amenée d'air).



 $t_0 + 18 \ min \ 00s$ : de nombreuses réinflammations d'imbrûlés s'effectuent à partir du coin en haut à droite de l'ouverture.



 $t_0 + 19 \ min \ 00s$  : les flammes sortent maintenant en continue à l'extérieur du local, de façon privilégiée du côté du VE.



 $t_0+19 \ min \ 09s$  : légère et subite augmentation du « volume de flamme », vraisemblablement due à l'activation du TPRD.





 $t_0+19 \ \text{min} \ 10s$ : suivie d'une diminution nette du régime de combustion, d'une baisse importante du plafond de fumée et d'une densification apparente de ces fumées.



 $t_0+19 \ min \ 11s$ : phénomènes suivis d'une inflammation des gaz en partie haute depuis l'arrière du volume et progressant vers l'avant.



 $t_0$ + 19 min 11s : augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.



 $t_0$ + 19 min 11s : augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.





 $t_0\!+\!19$  min 12s : augmentation importante de la taille des flammes sortant du volume.



 $t_0 + 19 \ min \ 13s$  : la principale zone de combustion se situe sur la droite du volume, côté VE.



 $t_0 + 19 \ min \ 15s$ : la zone de flammes augmente et occupe l'ensemble de la partie haute du volume d'essai. La hauteur des flammes sortant du volume semble cependant se stabiliser.



 $t_0 + 19 \ min \ 18s$  : stabilisation du régime de l'incendie.





 $t_0 + 19 \ min \ 37s$  : l'intensité du phénomène semble décroître.



t<sub>0</sub>+ 19 min 44s : l'intensité de l'incendie continue de décroître.



 $t_0 + 20 \ \text{min } 00s$ : l'intensité de l'incendie semble, en apparence, revenir à son état de développement avant le déclenchement du TPRD. La taille des flammes sortant du local est du même ordre de grandeurl.

Des flammes de taille plus importante s'échappent par la droite de l'ouverte, coté VE.



t<sub>0</sub>+ 20 min 51s : explosion du pneu avant droit du VT ayant pour conséquence immédiate une augmentation du « volume de flamme ».





 $t_0 + 23 \ \text{min } 00s$  : l'intensité du foyer semble continuer de croître.



 $t_0 + 26 \ \text{min } 00s$ : feu pleinement développé à l'ensemble du volume, les flammes sortent sur toute la partie haute de l'ouverture en face avant du local.



 $t_0\!+\!27$  min 30s : densification du ciel gazeux et diminution progressive de la hauteur libre de fumées (et de flammes) en entrée du local.



 $t_0 + 28 \ \text{min} \ 20s$  : l'interface entre les flammes s'échappant du local et l'amenée d'air continue de décroître.



t <sub>0</sub> + 28 min 22s : arrêt de l'enregistrement vidéo.