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

CONFIDENTIEL

RAPPORT D'ESSAI SUR SITE n°13/6836

Étude d'un feu de véhicule électrique stationné à proximité d'un véhicule thermique dans une structure béton.

Essai réalisé le 3 juillet 2013

au MESNIL ST DENIS dans les Yvelines (78)

Rédigé le 07/01/2014 **par:**	**Validé le** 07/01/2014 **par:**	**Approuvé le** 07/01/2014 **par:**
Mathieu SUZANNE (MPI-IDF) et Eddie FAURE (ENV-AIM)	Le chef du pôle MPI (signé) Patrick PINEAU	Le chef de section MPIIDF (signé) Hervé BAZIN

Ce document est la propriété intellectuelle du Laboratoire central de la Préfecture de Police. Toute reproduction ou toute diffusion est interdite sans l'autorisation du Laboratoire central de la Préfecture de Police.

Sommaire

1 Introduction 3

2 Objet 3

3 La batterie Lithium-Ion 3

4 Présentation de l'essai 4

4.1 Site et dispositif expérimental 4

4.2 Protocole d'essai 5

4.3 Type et position des véhicules 6

4.4 Installation des matériels et du poste de mesure 6

4.5 Mesures de gaz par le pôle Environnement 9

4.6 Implantation des capteurs sur le véhicule 11

4.7 Signal électrique 11

4.8 Évaluation des dégradations sur la structure béton 11

5 Déroulement de l'essai et résultats 12

5.1 Conditions initiales 12

5.2 Scénario de feu : 12

5.3 Événements observés pendant l'essai : 13

5.4 Tension en sortie de batterie 29

5.5 Températures mesurées près du pack batterie 29

5.6 Mesures de température dans le local 29

5.7 Mesures de flux thermique incident 32

5.8 Mesures d'oxygène, de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone 32

5.9 Analyses des autres gaz prélevés dans le local. 33

5.10 Déformations de la structure 36

6 Bilan 41

7 Références 43

8 ANNEXES 44

Index des illustrations

Illustration 1: Position de la batterie de traction sur la Kangoo ZE....5
Illustration 2: Vue de face du bâtiment....5
Illustration 3: Vue de la droite du garage avant obstruction des ouvrants....6
Illustration 4: Vue de la gauche du garage et de la porte latérale en bois actionnée par les sapeurs-pompiers avant obstruction des ouvrants....6
Illustration 5: Vue du volet aménagé dans la porte en façade pour modifier l'oxygénation du foyer....6
Illustration 6: Vue schématique de la structure....6
Illustration 7: Emplacement des véhicules lors de l'essai. Le véhicule thermique est à gauche de la photo et le véhicule électrique se trouve à droite....7
Illustration 8: Schéma de l'emplacement des véhicules dans la structure. Les portes en façade n'ont, volontairement, pas été reproduites....7
Illustration 9: Vue d'une Kangoo ZE après emballement de la batterie en extérieur....8
Illustration 10: Implantation des capteurs sur le pack batterie....13
Illustration 11: Préparation de la cartographie laser 3D par l'IRCGN : définition de la référence topographique extérieure....14
Illustration 12: Vue du local après essai....29
Illustration 13: Détail des restes de palettes incandescentes à l'arrière du Kangoo ZE....29
Illustration 14: Vue de l'arrière de la structure. Le véhicule électrique est stationné à l'intérieur du bâtiment sur la gauche de l'image et le véhicule thermique au niveau de l'ouvrant visible en face arrière. Il est possible de distinguer une partie des flammes localisées sur le véhicule thermique à travers l'espace entre le volet et l'ouverture....31
Illustration 15: Au moment de l'augmentation des températures, une augmentation du volume de flamme est clairement visible sur la droite de l'ouvrant placé en face arrière. Aucune augmentation sensible de la production de fumée n'est visible....31
Illustration 16: Vue de l'arrière du local avant la brusque augmentation de température entre 40 min et 41 min 30....32
Illustration 17: Vue de l'arrière du local pendant la brusque augmentation de température qui s'accompagne d'un fort dégagement gazeux par l'ensemble des ouvertures et zones de fuite....32
Illustration 18: Déformation de la structure béton mesurée par l'IRCGN par cartographie laser 3D [3]....41
Illustration 19: Confrontation des concentrations en oxygène (%) mesurées avec un analyseur paramagnétique (bleu) et une sonde lambda (rouge) en un point fixe à l'intérieur du local....50

1 Introduction

Le développement du parc automobile à énergie électrique et, en particulier, l'usage des batteries de nouvelle génération à base de lithium (lithium-ions, lithium métal polymère, etc.) nécessitent de la part des services de secours une adaptation des procédures d'intervention. Par ailleurs, l'évaluation des risques supplémentaires éventuels liés au stationnement de ces véhicules en parc de stationnement couvert devient opportune, tant sur l'extinction d'un feu que sur les postes de charge électrique associés.

Le LCPP, le SDIS 78 et la BSPP ont profité d'une mise à disposition par le constructeur RENAULT d'une automobile électrique pour mener un essai commun. Le LCPP a ainsi été maître d'œuvre sur la rédaction du protocole expérimental, sur l'installation des matériels de mesure et lors du déroulement de l'essai. Le SDIS 78 s'est chargé de la logistique, des aménagements effectués dans le bâtiment avant l'essai et de l'interface avec le constructeur. Enfin, sous couvert de la DGSCGC, la BSPP a été autorisée à mener des essais de brûlage et d'extinction sur ce type de véhicules.

Un véhicule de type Kangoo ZE à traction électrique a été fourni pour un test visant à évaluer l'impact qu'aurait, sur sa batterie électrique de traction, un feu de cette même voiture stationnée à l'intérieur d'une structure béton à proximité d'un véhicule thermique. Du fait du confinement, les conditions de combustion et de propagation d'un feu dans une structure sont très différentes de ce qui se produit en extérieur. Il était donc important, pour les intervenants sapeurs-pompiers en particulier, d'évaluer les problématiques existantes, inhérentes au stationnement de véhicules électriques en structure ainsi que l'effet du feu sur le comportement d'une structure de stationnement couverte en béton. Le garage utilisé est situé au Mesnil Saint Denis dans les Yvelines (78). Il est à noter que des essais en plein air ont déjà été réalisés par les mêmes partenaires et que les conclusions de ces études sont disponibles dans le rapport [1].

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

Le LCPP a procédé aux essais décrits ci-après dans le respect du protocole qui avait préalablement été soumis au constructeur RENAULT, au SDIS 78 et à la BSPP, et des conditions de confidentialité prescrites.

2 Objet

L'objet de l'essai est d'évaluer l'impact d'un feu de véhicule électrique associé à un véhicule thermique sur les conditions d'emballement[1] thermique de la batterie de traction et la structure béton d'un parc de stationnement.

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

3 La batterie Lithium-Ion

Le véhicule électrique Renault, utilisé pour le test, est équipé d'une batterie composée de 48 modules de puissance, disposés en deux rangées côte à côte. Chacun de ces modules comprend quatre cellules élémentaires. Ces quatre cellules délivrent 8,4V, soit 400V en courant continu pour la totalité des 48 modules composant la batterie.

1 L'emballement thermique survient lorsque le taux de génération de chaleur à l'intérieur de la batterie excède sa capacité à dissiper la chaleur.

Le courant alternatif du circuit de charge est transformé par l'intermédiaire d'un convertisseur interne en courant continu pour être emmagasiné dans les cellules électrochimiques des batteries.

Illustration 1: Position de la batterie de traction sur la Kangoo ZE.

4 Présentation de l'essai

4.1 Site et dispositif expérimental

Le site d'expérimentation est situé dans les Yvelines (78) au Mesnil Saint Denis. Il s'agit d'un centre d'accueil désaffecté comprenant plusieurs bâtiments, dont un garage de 70 m^2 dans lequel a été réalisé l'essai (Illustrations 2 à 4). Le local contient trois places de stationnement. Une partie des bâtiments est destinée à une démolition prochaine (dont le garage) alors que le reste sera réhabilité dans un futur proche.

Le dispositif expérimental a été limité au garage et à ses proches abords. Le local disposait de trois portes coulissantes doublées par autant de rideaux métalliques à action mécanique. Ces derniers ne pouvaient être descendus, car le système n'était plus alimenté électriquement. Les portes ayant fait l'objet de vandalisme et le site ayant servi lors d'un précèdent essai, leur fermeture n'était pas totale et le confinement en façade seulement partiel malgré un travail préalable de fixation et d'ajustement. Pour permettre une modification de la ventilation du foyer lors de l'essai, lorsque nécessaire, la porte de gauche en façade a été modifiée en ajoutant un volet mobile en partie basse (Illustration 5).

Illustration 2: Vue de face du bâtiment.

Les fenêtres sur le côté droit et sur la face arrière ont été obstruées afin d'augmenter le confinement du local. La fenêtre côté gauche du bâtiment a été laissée ouverte. Un battant de la porte latérale en bois sur

le côté gauche du bâtiment a été maintenu fermé tout au long de l'essai et l'autre a été actionné par les sapeurs-pompiers sur demande afin de modifier l'oxygénation du foyer.

Illustration 3: Vue de la droite du garage avant obstruction des ouvrants.

Illustration 4: Vue de la gauche du garage et de la porte latérale en bois actionnée par les sapeurs-pompiers avant obstruction des ouvrants.

Le bâtiment a une surface au sol de 8 x 8,70 m^2 pour une hauteur sous plafond de 3,015 m à l'exception de deux poutres ramenant la hauteur sous plafond à 2,75 m par endroits (Illustration 6).

Illustration 5: Vue du volet aménagé dans la porte en façade pour modifier l'oxygénation du foyer.

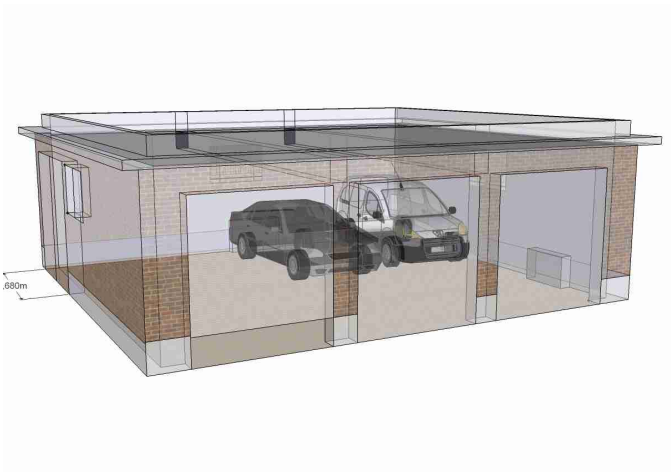


Illustration 6: Vue schématique de la structure.

4.2 Protocole d'essai

Un protocole d'essai a été préalablement rédigé pour définir les processus et les mesures à réaliser, répertorier les matériels nécessaires à l'instrumentation, répartir les missions des personnels impliqués dans le projet et décrire les séquences de l'essai. Ce protocole a été préalablement soumis pour avis au constructeur RENAULT, au SDIS 78 et à la BSPP.

Il n'était pas prévu d'intervention des sapeurs-pompiers durant les différentes phases du brûlage.

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

4.3 Type et position des véhicules

Le véhicule thermique est de marque Volkswagen, modèle Polo. Il comporte 20 l d'essence dans son réservoir. La vitre latérale avant côté conducteur est ouverte. Il est stationné en marche arrière sur la place centrale à l'intérieur de la structure.

Le véhicule Renault Kangoo ZE, également stationné en marche arrière, est placé sur la droite de la structure. Cette position est considérée comme étant la plus défavorable à l'intérieur du volume. En effet, c'est à cet emplacement que le confinement est maximal et que le maximum de conditions est réuni afin de provoquer l'emballement thermique de la batterie.

La batterie de traction est chargée à 100% de sa valeur maximale afin, une nouvelle fois, de se placer dans les conditions les plus défavorables.

Enfin, afin d'être dans des conditions d'essai les plus proches possible d'une utilisation quotidienne du véhicule utilitaire, deux palettes en bois de taille standard ont été disposées dans le coffre de la Kangoo ZE.

La porte latérale arrière côté passager (et, par conséquent, côté véhicule thermique) ainsi que la fenêtre avant conducteur du véhicule ont été maintenues ouvertes pendant le déroulement de l'essai. Ce scénario pourrait reproduire un vandalisme sur la voiture suivie d'une mise de feu volontaire dans l'habitacle.

Illustration 7: Emplacement des véhicules lors de l'essai. Le véhicule thermique est à gauche de la photo et le véhicule électrique se trouve à droite.

Illustration 8: Schéma de l'emplacement des véhicules dans la structure. Les portes en façade n'ont, volontairement, pas été reproduites.

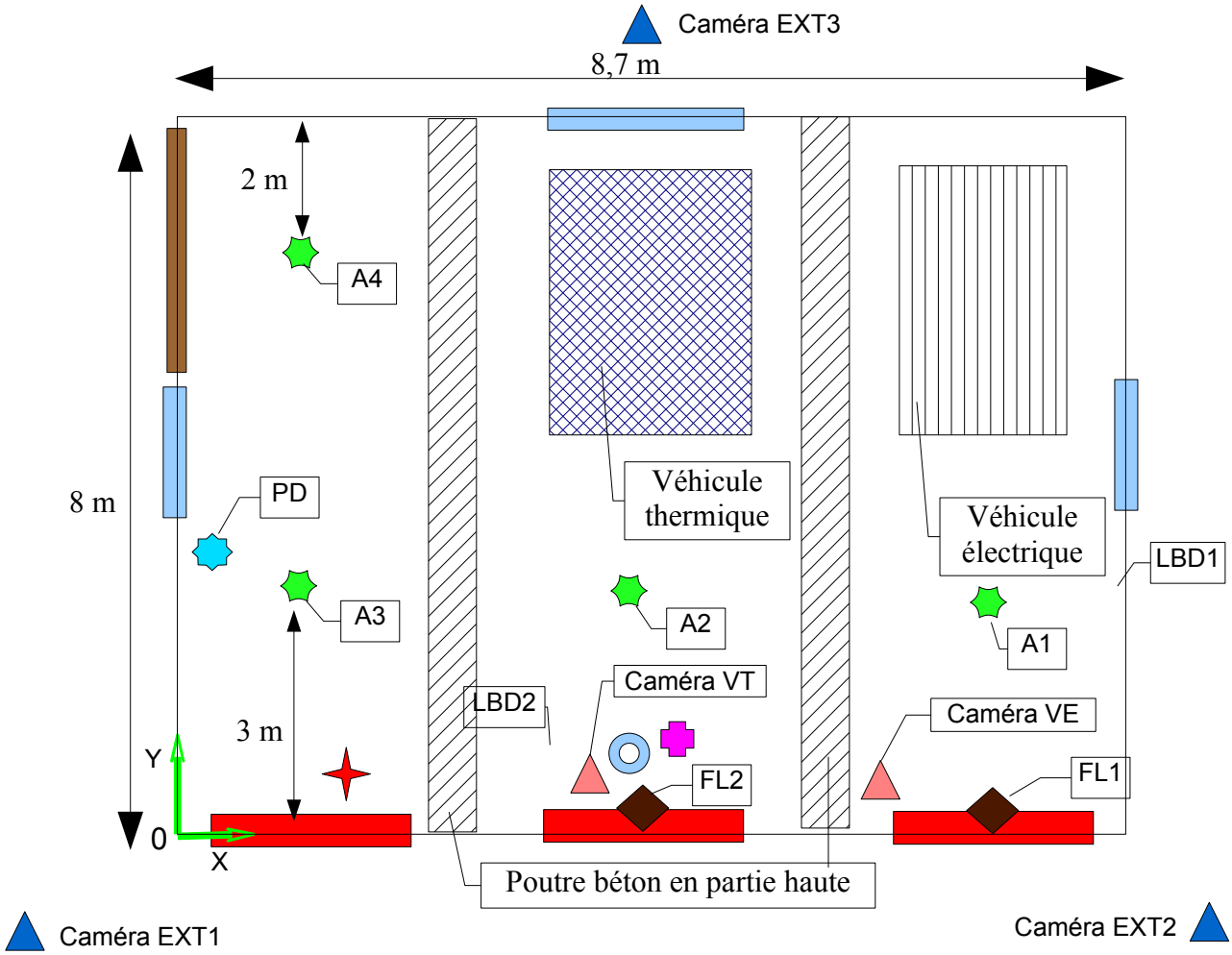
Pour rappel [1], lors d'une mise de feu dans l'habitacle d'une Kangoo ZE (modèle "utilitaire") en extérieur, l'emballement thermique de la batterie de traction n'a pas été atteint. Pour obtenir cet emballement, une charge calorifique supplémentaire a dû être disposée sous le véhicule. La photo ci-dessous permet de visualiser les flammes résultant de l'emballement thermique.

Illustration 9: Vue d'une Kangoo ZE après emballement de la batterie en extérieur.

4.4 Installation des matériels et du poste de mesure

Le poste central des mesures (PC) et les matériels d'acquisition ont été installés dans le bâtiment à l'arrière du garage visible sur les illustrations 3 et 4. Un groupe électrogène a été mis à disposition du LCPP par le SDIS 78 afin d'alimenter en électricité les équipements de mesure.

Plan schématique du garage et emplacement des capteurs



Portes coulissantes :

- Pendant l'essai, elles ont été maintenues fermées avec une partie mobile actionnable en partie basse sur la porte de gauche permettant, sur demande, l'oxygénation du foyer comme mentionné précédemment.

Porte en bois :

- Le battant gauche de la porte latérale en bois (côté gauche du bâtiment) a été maintenu fermé tout au long de l'essai. Le battant droit a été maintenu mobile au cours de l'essai afin de contrôler l'oxygénation du foyer.

Fenêtre :

- Elles ont été obstruées par le SDIS78 avant le début des essais sauf celle située sur la gauche du bâtiment pour laquelle seuls 50% de sa surface a été bloquée.

Caméra CCD interne :

- Deux caméras CCD ont été installées sur le sol à l'intérieur de la structure. Chaque caméra a filmé un des deux véhicules afin de suivre le développement du foyer et sa propagation d'un véhicule à l'autre.

Caméra CCD externe :

- Trois caméras CCD ont été installées à l'extérieur du local. La première caméra a filmé un plan général de la face gauche du local et la seconde a filmé les faces avant et droite du bâtiment. Les images de ces vidéos ont été retransmises sur deux écrans placés dans le PC mesure.

Thermobarohygromètre :

- Le thermobarohygromètre utilisé pour le relevé des conditions initiales et finales d'essai a été placé à l'intérieur du bâtiment à proximité de la porte latérale gauche.

Prélèvement d'air :

Un prélèvement d'air a été réalisé à l'intérieur du local pour les analyses suivantes :

- mesures de fluorure en 1 point d'ambiance dans le local à l'aide de pompes autonomes puis analyses en laboratoire,

- mesures de COV en 1 point d'ambiance dans le local à l'aide de pompes autonomes puis analyses en laboratoire.

Arbre à thermocouples :

- Les thermocouples de type K, gainés en inconel et d'un diamètre de 1,5 mm ont été implantés suivant le plan joint. Ils ont été fixés sur des chaînes et disposés verticalement tous les 50 cm à partir du sol.

Fluxmètre :

- Deux fluxmètres ont été placés à 1,5 m du sol en direction des foyers et ont été fixés dans les rideaux de protection en façade du bâtiment. L'un a été placé face au véhicule électrique et l'autre face au véhicule thermique.

Mesure gaz :

- Un analyseur a mesuré la concentration en O_2/CO/CO_2 à 1,5 m de hauteur. Ce point de prélèvement a été associé à une mesure de température.

Sonde lambda :

- Deux sondes lambda ont été installées dans le local : la première à l'emplacement du point de mesure O_2/CO/CO_2 ; la seconde, à 1,5 m de hauteur au niveau de l'arbre à thermocouples A1 afin d'estimer l'oxygénation du foyer. L'utilisation de ce type de capteur est en cours de développement au LCPP et leur implantation a uniquement pour but une mise en situation sur site pour une évaluation de la méthode de mesure. Les résultats sont présentés en annexe 3 du présent document.

Pression différentielle :

- Afin de mesurer la surpression générée par les gaz de combustion lors de l'essai, deux mesures de pression différentielle ont été effectuées entre l'intérieur du local et l'ambiant : le premier point en partie haute et le second en partie basse du volume d'essai. Ce point de pression différentielle a été associé à un capteur de température pour une éventuelle correction de la mesure.

Les coordonnées des points de mesure sont récapitulées dans les tableaux 1 et 2. Les positions sont repérées par rapport à une origine placée arbitrairement dans le coin avant gauche du bâtiment. La hauteur des thermocouples placés sur chaque arbre est repérée par rapport au niveau du sol du local.

Tableau 1: Position des points de mesure par rapport à l'origine spatiale.

Coordonnées	X (m)	Y (m)	Z (m)
A1	7	2,7	/
A2	4,3	2,7	/
A3	1,7	2,7	/
A4	1,7	5,8	/
PDB	0,05	3	0,75
PDH	0,05	3	2,5
FL1	7,1	0	1,5
FL2	4,7	0	1,5
O_2/CO/CO_2	4,3	2,7	1,5
LBD1	7	2,7	1,5
LBD2	4,3	1	1,5

Tableau 2: Emplacement des thermocouples sur la verticale d'un arbre.

Numérotation du thermocouple	Hauteur par rapport au sol Z(m)
Ax-TC1	0,5
Ax-TC2	1
Ax-TC3	1,5
Ax-TC4	2
Ax-TC5	2,5
Ax-TC6	3

4.5 Mesures de gaz par le pôle Environnement

4.5.1 Présentation de la mesure

Il a été décidé, comme décrit sur le protocole expérimental, de réaliser une évaluation des concentrations en polluants émis lors de l'incendie en milieu confiné de deux véhicules (un véhicule électrique et un véhicule thermique). L'objectif de cette étude est d'estimer les concentrations auxquelles pourraient être soumis des sapeurs-pompiers ou autres personnels au cours de leur exposition.

4.5.2 Prélèvements et mesures sur site

4.5.2.1 Description des lieux et des points de prélèvements

Quatre prélèvements ont été réalisés en un même point (même emplacement que la mesure en O_2, CO, CO_2), dans l'air intérieur de la structure, lors des différentes phases de l'incendie des véhicules :

- phase 1 : mesure pendant la phase d'incendie jusqu'à l'emballement de la batterie ;
- phase 2 : mesure depuis l'emballement de la batterie jusqu'à l'extinction « naturelle » de l'incendie ;
- phase 3 : mesure pendant 30 minutes après l'extinction ;
- phase 4 : mesure entre 30 minutes et 1h après l'extinction.

À la fin des mesures, des fumées étaient encore émises au niveau des véhicules incendiés.

Les mesures permettaient d'évaluer la persistance de certains composés dans l'air du volume de la structure pendant et après l'incendie des deux véhicules stationnés côte à côte.

Les périodes de mesure sont résumées dans le Tableau 3.

Tableau 3: Méthodes et périodes de mesure.

Points de mesure	Périodes de mesure le 14 novembre 2012
Prélèvement point fixe dans la structure	Phase 1 : de 14 h 34 à 15 h 34
	Phase 2 : de 15 h 34 à 16 h 19
	Phase 3 : de 16 h 19 à 16 h 49
	Phase 4 : de 16 h 49 à 17 h 19

Les mesures ont été réalisées à poste fixe à 1,5 mètre du sol (hauteur des voies respiratoires d'un intervenant debout).

4.5.2.2 Méthodes

Le descriptif des méthodes figure en annexe 2 du rapport.

- **Mesure des COV par prélèvement actif**

Les mesures de concentration en Composés Organiques Volatils (benzène, naphtalène et styrène) dans l'air intérieur (prélèvement à point fixe) sont réalisées par prélèvement actif sur tube contenant du charbon actif suivi d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse. Les prélèvements et les analyses sont réalisés selon la norme NF EN 14662-2 *« Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène. Partie 2 : Prélèvement par pompage suivi d'une désorption au solvant et d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse »* et les méthodes internes AIM_MOP0277 pour le prélèvement et LAI_MOP0294 pour l'analyse.

- Mesure des anions par prélèvement actif

Les mesures de concentration en fluorures et en chlorures dans l'air intérieur (prélèvement à point fixe) sont réalisées par prélèvement actif sur filtre de quartz imprégné de carbonate de calcium suivi d'une analyse par chromatographie ionique. Les prélèvements et les analyses sont réalisés selon *la méthode metropol 009 préconisée par l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS).*

- Mesure de la température, de l'humidité relative et de la pression atmosphérique

La température extérieure est mesurée en continu à l'aide d'un thermomètre. La pression atmosphérique et l'humidité relative sont mesurées à l'aide d'un baromètre et d'un hygromètre.

4.6 Implantation des capteurs sur le véhicule

Aucun thermocouple n'a été placé dans l'habitacle des véhicules. Sept thermocouples ont été installés dans le pack batterie par RENAULT selon le schéma ci-dessous :

1 thermocouples sur le dessus du carter sup (TPo1) 1 sur chaque *PRD* (TPo2 et TPo3) 1 sur le SD/SW (TPo4)	1 sur chaque face latérale (TPo5 et TPo6) 1 sous la face inférieure (TPo7)

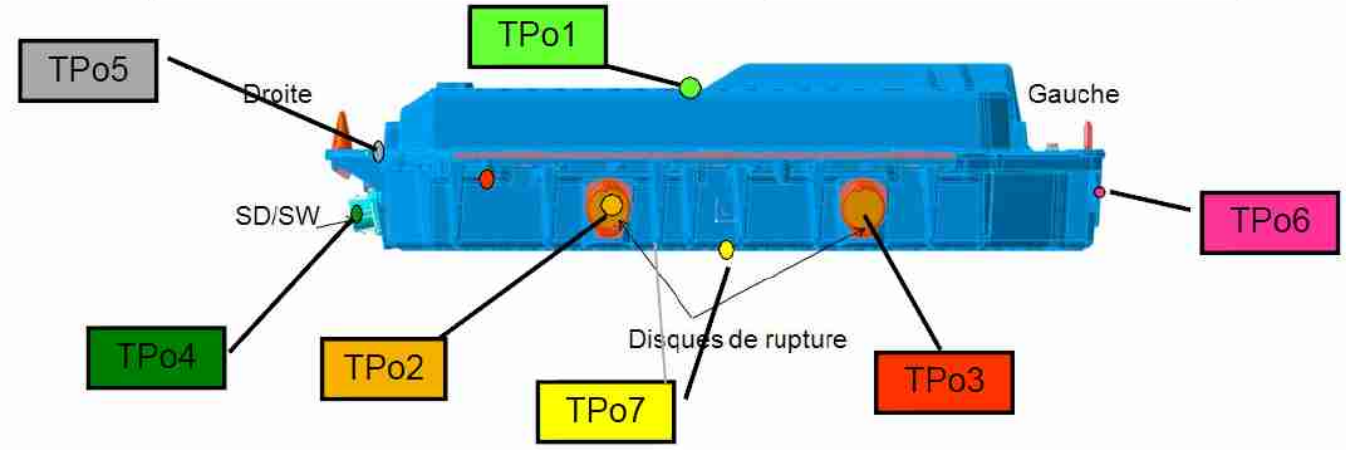


Illustration 10: Implantation des capteurs sur le pack batterie.

Le LCPP s'est chargé de l'acquisition de ces températures.

4.7 Signal électrique

La détermination de l'occurrence de l'emballement thermique de la batterie à partir des données de température uniquement n'est pas toujours possible. Par conséquent, les mesures thermiques ont été couplées à une acquisition de tension aux bornes de la batterie de traction. RENAULT s'est chargé de l'interface permettant la connexion entre la batterie et le système d'acquisition du LCPP.

4.8 Évaluation des sollicitations et des dégradations sur la structure béton

Les dégradations sur la structure du local sont évaluées grâce à l'IRCGN qui a mis à disposition un appareil de cartographie laser 3D. Une cartographie du local est ainsi réalisée avant et après l'essai, ce qui permet d'identifier et quantifier les déformations de la structure.

En complément, les températures extérieures surfaciques de la structure ont été estimées par le Büro fur Brandschutz à l'aide d'une camera thermique. Ces valeurs, portées en annexe 4, sont à traiter avec toutes les précautions d'usage et les incertitudes liées à la complexité de ce type de mesure.

Illustration 11: Préparation de la cartographie laser 3D par l'IRCGN : définition de la référence topographique extérieure.

5 Déroulement de l'essai et résultats

5.1 Conditions initiales

Les conditions initiales mesurées à l'intérieur du local avant l'essai sont les suivantes :

Tableau 4: Conditions initiales à l'intérieur du local.

	Température (°C)	Hygrométrie (%)	Pression atmosphérique (hPa)
Début d'essai à 14 h 34 min 40 s	18,4	88	991,22

5.2 Scénario de feu :

La mise de feu a été réalisée à l'aide de pâte à feu répandue dans l'habitacle du véhicule électrique. Le choix d'un allumage sur le véhicule électrique s'explique par une recherche des conditions les plus défavorables pour la batterie de traction. En effet, c'est dans cette configuration que la sollicitation thermique sera la plus longue sur la batterie. Le principe repose sur un développement du foyer primaire et sa propagation à l'ensemble du véhicule électrique, suivis d'une propagation vers le véhicule thermique pour que ce dernier entretienne des conditions de température et de flux défavorables pour la batterie de la Kangoo ZE. Il s'agit, de plus, d'un scénario de feu réaliste dans un parc de stationnement.

En fonction des mesures de température et du développement du feu, la ventilation, et par conséquent la puissance du foyer, sont gérées manuellement par l'ouverture d'un vantail de la double porte latérale du garage ainsi que de l'ouvrant sur la partie basse de la porte de gauche en façade.

5.3 Événements observés pendant l'essai :

Les observations récapitulées dans le Tableau 13 placé en annexe 5 ont été notées en temps réel par les opérateurs au cours de l'essai. Les événements peuvent donc être légèrement décalés et/ou moins précis que ceux obtenus suite à l'analyse des vidéos et des mesures.

Une analyse plus précise des enregistrements vidéo de l'essai a mené à des observations plus fines de son déroulement ainsi que des phénomènes critiques. Les images extraites de la vidéo enregistrée par la caméra placée face au véhicule thermique sont présentées dans le Tableau 5. Certaines images provenant des autres caméras sont disponibles en annexe 6 du présent document dans les Tableaux 14 et 15.

Tableau 5: Images du déroulement de l'essai depuis une des deux caméras situées à l'intérieur de la structure.

	t_0 : allumage de la pâte à feu répandue sur le siège arrière du véhicule électrique. La porte latérale arrière côté passager est maintenue ouverte tout comme la fenêtre avant côté conducteur.
	t_0 + 0 min 16 s : allumage de la pâte à feu répandue sur le siège avant du véhicule électrique.
	t_0 + 1 min 30 s : la lueur des flammes à l'intérieur du véhicule électrique augmente mais aucune flamme n'est encore visible du côté droit malgré la porte latérale maintenue ouverte.

	t_0 + 1 min 55 s : une fumée dense et noire sort par la porte latérale du véhicule électrique sans qu'aucune flamme ne soit visible côté passager. Des flammes sortent déjà de la vitre côté conducteur et leur hauteur dépasse le toit du véhicule.
	t_0 + 2 min : la production de fumée depuis l'habitacle du véhicule électrique est de plus en plus rapide et les flammes commencent à sortir par la porte latérale côté passager.
	t_0 + 2 min 5 s : Côte passager, la fumée dense produite dans l'habitacle s'enflamme brusquement. Les flammes ainsi créées sont proches d'atteindre la poutre du plafond.

	t_0 + 2 min 30 s : la taille des flammes sortant de chaque côté du véhicule électrique est sensiblement équivalente. Côté passager, elles impactent largement la poutre béton.
	t_0 + 3 min 14 s : bris de la fenêtre avant passager du véhicule électrique. Depuis une quinzaine de secondes environ, de la matière enflammée commence à s'accumuler à l'aplomb de la porte latérale droite du véhicule électrique.
	t_0 + 3 min 30 s : au centre du bâtiment, le plafond de fumée est descendu quasiment jusqu'au toit du véhicule thermique. Le rayonnement de cette couche de fumée et des flammes provenant du véhicule électrique provoque la thermolyse du rétroviseur et des joints de porte côté conducteur du véhicule thermique.

	t_0 + 4 min : la thermolyse au niveau du véhicule thermique augmente avec une forte production de gaz de décomposition depuis l'intérieur du véhicule. Le plafond de fumée dans le volume augmente et la hauteur libre de fumée descend progressivement jusqu'à se trouver approximativement au niveau du toit du véhicule thermique. À t_0 + 4 min 30 s, le plafond de fumée se stabilise à hauteur du toit du véhicule thermique. De légers amas de matière enflammée sont visibles au sol côté conducteur.
	t_0 + 5 min 3 s : les flammes, toujours localisées à l'intérieur du véhicule électrique, se sont maintenant aussi déplacées vers l'avant avec une propagation sur le capot et le phare avant gauche. La plaque de protection de la fenêtre droite du bâtiment est enflammée sur quasiment toute sa surface. Le véhicule thermique continue de largement thermolyser.
	t_0 + 5 min 47 s : chute du rétroviseur côté passager du véhicule électrique.

	t_0 + 7 min : les flammes se sont maintenant propagées à l'ensemble de la surface du capot. Aucune flamme n'est visible sous le véhicule électrique. Il n'y a donc toujours aucune attaque thermique du carter batterie 7 minutes après le début de l'essai.
	t_0 + 7 min 15 s : une brusque augmentation du volume flamme est visible à partir de l'habitacle du véhicule électrique, majoritairement côté passager. Cela peut être attribué à l'explosion d'un équipement sous pression (système d'armement de l'airbag par exemple). Lors de ce phénomène éphémère, l'attaque thermique du véhicule à moteur thermique augmente car une partie de son côté conducteur est englobé dans le volume des flammes.
	t_0 + 7 min 17 s : le phénomène d'explosion décrit précédemment a pour conséquence de propager les flammes au véhicule thermique en enflammant la forte production de gaz de thermolyse évoquée précédemment. Plusieurs amas de matière enflammée provenant du véhicule électrique sont dorénavant visibles à plusieurs endroits au sol. Ils ne sollicitent cependant pas encore directement la batterie de traction par sa face inférieure.

	t_0 + 8 min : les flammes se propagent rapidement sur le véhicule thermique. Elles sortent maintenant par l'ensemble de la fenêtre conducteur. Le rétroviseur enflammé côté conducteur du véhicule thermique tombe au sol à proximité du pneu avant.
	Dès t_0 + 8 min 30 s, des gouttes enflammées tombent sur et au pied du pneu avant gauche du véhicule électrique. t_0 + 9 min 30 s : la quantité de matière enflammée au sol continue d'augmenter, particulièrement entre les deux véhicules.
	t_0 + 9 min 57 s : nouvelle brusque augmentation du volume de flamme, encore une fois attribuable à l'explosion d'un élément sous pression, à l'intérieur de l'habitacle.

	t_0 + 10 min 5 s : l'explosion évoquée précédemment n'a eu cette fois que peu de conséquences visibles sur le développement du feu.
	t_0 + 10 min 54 s : augmentation soudaine du volume de flamme entre les deux véhicules. Il est observé un changement dans la dynamique des fumées à l'intérieur du volume.
	t_0 + 11 min 11 s : légère, mais brusque augmentation du volume des flammes entre le véhicule thermique et le véhicule électrique. Cela peut être attribué à l'explosion du pneu ou de l'amortisseur arrière droit du véhicule électrique.

	t_0 + 11 min 30 s : l'intensité du foyer sur le véhicule thermique a diminué et il n'est plus possible de distinguer des flammes sortant de la fenêtre du conducteur. De chaque côté du véhicule électrique, des flammes sont visibles entre le bas de caisse et le sol alors que l'intensité du feu dans l'habitacle reste constante. Une flamme vive est également visible entre l'arrière du véhicule électrique et le mur du bâtiment.
	t_0 + 12 min 13 s : brusque et forte augmentation du volume de flamme à partir de l'avant gauche du véhicule électrique engendrant un mouvement de ce dernier. Il est probable que cela soit la conséquence d'une explosion du pneu côté passager.
	t_0 + 13 min : plusieurs foyers sont dorénavant visibles sur le sol notamment près du pneu avant droit côté passager.

	À t_0 + 13 min 35 s, une brusque augmentation du volume de flamme est observée sur le côté passager du véhicule électrique. t_0 + 13 min 50 s : pendant la courte durée de ce phénomène, le flux thermique incident sur le pneu avant gauche du véhicule thermique augmente accélérant la combustion de ce dernier.
	t_0 + 14 min 46 s : le parechoc avant et la calandre du véhicule électrique chutent encore un peu plus vers le sol, entrant en contact avec l'arbre à thermocouples numéro 1.
	t_0 + 15 min 30 : l'ensemble du véhicule électrique est maintenant embrasé. Les flammes sur l'avant du véhicule ont tendance à s'incliner vers le mur droit du bâtiment, illustrant la dynamique en partie haute du local avec une oxygénation majoritaire du foyer en provenance de la gauche du bâtiment où se trouvent les ouvertures vers l'extérieur.

	t_0 + 17 min 30 s : sur le véhicule électrique, l'intensité du feu a diminué à l'intérieur de l'habitacle et la majorité des flammes est maintenant située sur l'avant et l'arrière de la caisse. Les flammes sur l'avant gauche du véhicule thermique gagnent en intensité.
	t_0 + 18 min : le plafond de fumée descend à l'intérieur du local accompagné par une perte de visibilité en partie basse. Cela est la conséquence d'une fermeture de la porte latérale du bâtiment.
	t_0 + 19 min 30 s : le plafond remonte progressivement dans le local (conséquence de l'actionnement des diverses ouvertures) et l'intensité du foyer sur le véhicule électrique augmente légèrement.

	t_0 + 21 min : par manque de combustible, l'intensité du foyer situé sur le véhicule électrique décline légèrement et par conséquent, les hauteurs de flammes. Sur le véhicule thermique, les flammes continuent à se propager ; il est possible de les deviner à l'intérieur de l'habitacle côté passager.
	t_0 + 23 min : l'intensité du feu sur le véhicule électrique décroît et le véhicule thermique prend le relais avec des flammes uniquement localisées sur le côté conducteur de la voiture ainsi que dans l'habitacle. Les flammes situées entre les deux véhicules proviennent maintenant majoritairement du véhicule thermique et non plus du véhicule électrique.
	t_0 + 23 min 36 s : dernières images avant la perte du signal vidéo.

Il n'a pas été possible, en se basant uniquement sur les images vidéo, de déterminer l'occurrence d'un emballement thermique de la batterie de traction de la Kangoo ZE. Trois raisons sont envisageables :

- l'emballement thermique n'a pas été atteint. Cependant, cette dernière hypothèse n'est pas valable, car une observation attentive du pack batterie après l'essai laisse clairement apparaître les stigmates du phénomène.

- l'emballement thermique se produit après la perte des signaux vidéos. À l'intérieur du local, le signal des cameras a été perdu environ 24 min après le début d'essai.

- l'intensité du phénomène d'emballement thermique n'est pas assez élevée pour qu'il soit distingué de la combustion 'classique' du reste du véhicule.

Les images rassemblées dans les Tableaux 6 et 7 proviennent des enregistrements webcam. Elles permettent d'avoir un angle de vue légèrement différent des deux véhicules. Une seconde webcam a été installée à l'intérieur du local près d'une heure après le début de l'essai.

Tableau 6: Déroulement de l'essai enregistré par la webcam.

	t_0 + 10 min 20 s : l'emballement n'a toujours pas été observé sur la batterie.
	t_0 + 10 min 52 s : l'apparition des flammes au niveau du milieu du châssis, de chaque côté du véhicule électrique, pourrait être considéré comme un signe annonciateur du début d'emballement thermique d'un des modules de la batterie de traction. Le phénomène n'étant pas aussi soudain que sur de précédents essais avec la même technologie, il est difficile de différencier le début de l'emballement d'événements 'parasites' comme la chute au sol et la combustion d'éléments enflammés (rétroviseur, etc.) ou le percement d'un pneu sous pression dont l'air va attiser la combustion en s'échappant.
	t_0 + 11 min 06 s : les flammes au niveau du milieu du châssis de chaque côté du véhicule électrique sont toujours visibles

	t_0 + 11 min 45 s : le phénomène décrit précédemment, durant environ 1 minute, se répète plusieurs fois lors de l'essai.

Tableau 7: Vue de l'intérieur du volume lors de la phase de déclin de l'incendie.

	t_0 + 1h 05 min : les flammes sur le véhicule électrique semblent être uniquement localisées sous l'avant de la voiture. Dans le véhicule thermique, des flammes sont aussi visibles sur l'avant de la voiture mais également dans l'habitable au niveau des sièges avant.

Tableau 8: Vue de l'intérieur du volume lors de la phase de déclin de l'incendie.

t_0 + 1 h 14 min 03 s : des flammes sont toujours visibles à l'intérieur de l'habitacle du véhicule thermique et sous le bloc moteur. De légères flammes sont également présentes sous l'avant du véhicule électrique ainsi qu'une zone incandescente à l'arrière du Kangoo ZE. Cette dernière peut être attribuée aux restes des palettes disposées dans le coffre du véhicule électrique.

Il peut être considéré, d'après les images extraites des vidéos, qu'il faut environ 13 min pour que la batterie commence réellement à être sollicitée d'une façon conjuguée par sa face supérieure (par l'intérieur de l'habitacle) et ses faces inférieure et latérales (par le carter métallique).

Illustration 12: Vue du local après essai.

Illustration 13: Détail des restes de palettes incandescentes à l'arrière du Kangoo ZE.

5.4 Tension en sortie de batterie

La mesure de tension en sortie de batterie n'a donné aucune indication exploitable, le signal ayant été perdu trop tôt dans l'essai pour pouvoir capter l'emballement de la batterie.

5.5 Mesures de température dans le local

Les températures mesurées sur les quatre arbres sont tracées dans les graphiques 1 à 4 .

Les niveaux de température les plus élevés ont été mesurés au niveau de l'arbre 1 situé devant le véhicule électrique. La longueur de la Kangoo ZE étant supérieure à celle du véhicule thermique, l'arbre 1 est par conséquent plus proche du pare-chocs avant des voitures que les trois autres arbres. L'arbre 1 est ainsi plus exposé aux différents phénomènes thermiques (convection, rayonnement, sollicitation directe comme lors de la chute du pare-chocs enflammé [cf. Tableau 5], etc.) expliquant ainsi les niveaux supérieurs de température mesurés.

Les températures mesurées sur l'arbre 3 sont proches de celles de l'arbre 4, à la différence près que, sur l'arbre 3, les valeurs varient avec une amplitude supérieure autour de la même valeur moyenne.

L'essai peut être divisé en deux phases, chacune associée à la combustion d'un des véhicules.

Sur les deux premières minutes d'essai, la température maximale, mesurée sur l'arbre 1, est de l'ordre de 50 °C. Le feu se développe à l'intérieur du véhicule électrique avec une croissance rapide à associer au déversement de pâte accélérante sur des matériaux facilement inflammables et largement énergétiques.

Entre 2 et 5 minutes, une croissance rapide se poursuit dans l'habitacle avec des flammes qui sortent par les fenêtres du véhicule électrique. La porte latérale est fermée permettant ainsi la formation d'une couche chaude en partie haute du local. Un premier pic de température est obtenu sur l'arbre 1 avec une valeur maximale d'environ 840 °C.

La chute de température observée peu après 5 minutes d'essai s'explique par l'ouverture partielle de la porte latérale, jusqu'alors majoritairement maintenue fermée, entraînant par conséquent l'évacuation d'une partie de la couche chaude capitalisée précédemment.

De 7 min 30 à 19 min, les températures augmentent à nouveau jusqu'à atteindre un pic, d'environ 770 °C à 2,5 m et 3 m sur l'arbre 1, 570 °C à 2,5 m et 3 m sur l'arbre 2 et 460 °C à 2 m, 2,5 m et 3 m sur l'arbre

3. Lors de cette phase, la taille du foyer continue d'augmenter au niveau du véhicule électrique jusqu'à atteindre son apogée. L'intensité du feu sur ce véhicule commence à décroître.

Autour de la 14e minute, une brusque augmentation de température est observée principalement sur le thermocouple à 0,5 m sur l'arbre 1 et légèrement sur ceux à 1 et 1,5 m. Cela correspond à la chute du pare-chocs avant du Kango ZE contre l'arbre à thermocouples et ainsi à une sollicitation directe des capteurs par les flammes provenant de l'élément plastique.

Une première propagation du véhicule électrique vers le véhicule thermique est observée peu après 7 minutes d'essai. Le foyer au niveau du véhicule électrique s'arrête cependant rapidement avec la chute du rétroviseur. La réelle propagation vers le véhicule thermique s'effectue par l'inflammation à 13 min 50 du pneu avant côté conducteur. Ce pneu n'est totalement enflammé qu'après 21 minutes d'essai et il s'en suit une croissance de l'intensité du foyer constitué par le véhicule thermique.

La transition entre un dégagement de chaleur provenant uniquement du véhicule électrique vers une contribution majoritaire du véhicule thermique s'effectue autour de la 28e minute. Cela se traduit par une stagnation des températures sur l'arbre 1 (proche du véhicule électrique) entre 28 min et 31 min 30 alors que, sur l'arbre 2 (et, accessoirement, les arbres 3 et 4), les températures augmentent sur ce même intervalle de temps.

Après 31 min 30 d'essai, une brusque augmentation des températures est mesurée sur les arbres 1 et 2. Cette augmentation est également vue par les deux autres arbres, mais le changement de pente est moindre. Les enregistrements vidéo de cette phase ne sont plus disponibles pour l'intérieur du bâtiment, mais uniquement l'extérieur. Il n'est donc pas possible de visualiser et déterminer avec certitude quel phénomène a pu mener à cette élévation de température. Par expérience, il n'a encore jamais été observé sur essai de rupture franche d'un réservoir de carburant qui aurait pu entraîner une variation si subite de température (près de 150 °C en partie haute) après le déversement et l'inflammation d'essence. Il est plutôt envisagé que cette augmentation de température soit la conséquence du bris d'un ou plusieurs éléments vitrés du véhicule thermique après que le feu se soit propagé et développé à l'intérieur de l'habitacle. Cela serait cohérent d'un point de vue temporel (premières flammes distinguées dans l'habitable onze minutes avant) et avec la brusque augmentation du volume de flamme autour de l'arrière du véhicule thermique comme distingué par l'ouvrant arrière du bâtiment. Cette augmentation du volume de flamme n'est visible sur la vidéo que pendant une dizaine de secondes et ne s'accompagne pas d'une augmentation sensible de production de fumée (voir les Illustrations 14 et 15) appuyant, encore une fois, l'hypothèse d'un bris de vitrage du véhicule thermique.

Illustration 14: Vue de l'arrière de la structure. Le véhicule électrique est stationné à l'intérieur du bâtiment sur la gauche de l'image et le véhicule thermique au niveau de l'ouvrant visible en face arrière. Il est possible de distinguer une partie des flammes localisées sur le véhicule thermique à travers l'espace entre le volet et l'ouverture.

Illustration 15: Au moment de l'augmentation des températures, une augmentation du volume de flamme est clairement visible sur la droite de l'ouvrant placé en face arrière. Aucune augmentation sensible de la production de fumée n'est visible.

Entre 32 et 40 minutes, les températures augmentent légèrement de façon linéaire (environ 8 °C/min pour l'arbre 1, 6 °C/min pour l'arbre 2 et 4,5 °C/min pour les arbres 3 et 4). Cela correspond au développement attendu d'un feu de véhicule thermique dans un volume clos. Des valeurs de 750 °C sont atteintes en partie haute (2,5 et 3 m) sur l'arbre 1, 600 °C sur l'arbre 2 et environ 550 °C sur les arbres 3 et 4. Il est à noter que, dans cette configuration expérimentale, ces niveaux de température à l'emplacement de l'arbre 1 indiquent que ce dernier se situe dans une zone réactionnelle (zone de flamme) ou dans son environnement très proche. Sur cette phase entre 32 et 40 minutes, le véhicule thermique est alors le contributeur majoritaire concernant l'énergie dégagée dans le local. Il est alors naturel de s'attendre à ce que les températures continuent de croître linéairement jusqu'à atteindre un plateau avant d'entamer une phase de décroissance progressive des températures lorsque le combustible est progressivement consommé.

Cependant, entre 40 min et 41 min 30 s, une brusque augmentation de température est mesurée (875 °C sur l'arbre 1 et 700 °C sur l'arbre 2). Visuellement (illustrations 16 et 17), cette variation de température s'accompagne d'une forte augmentation du volume de fumées dégagées par l'ensemble des ouvrants (sur les faces latérales) et les zones de fuites où la structure du bâtiment est fragilisée. Cela sera confirmé par les valeurs de concentration en oxygène, monoxyde et dioxyde de carbone présentées dans la section 5.8. L'ensemble des éléments converge donc vers l'hypothèse d'un emballement d'une ou plusieurs cellules de la batterie de traction du véhicule électrique lors de cette phase de l'essai et ne peut que difficilement être attribué à la combustion du véhicule thermique ou à un changement de ventilation dans le volume

Illustration 16: Vue de l'arrière du local avant la brusque augmentation de température entre 40 min et 41 min 30.

Illustration 17: Vue de l'arrière du local pendant la brusque augmentation de température qui s'accompagne d'un fort dégagement gazeux par l'ensemble des ouvertures et zones de fuite.

L'augmentation des températures est suivie d'une brusque décroissance des valeurs (vitesse de décroissance approximativement égale celle de croissance) correspondant à la fin de l'emballement des cellules de la batterie ayant réagi quelques minutes avant.

À partir de 43 minutes, les températures décroissent quasi linéairement (10 °C/min sur l'arbre 1, 8,7°C/min sur l'arbre 2 et 7,7 °C/min sur les arbres 3 et 4) jusqu'à la fin de l'acquisition des données, 1 h 30 après la mise de feu dans l'habitacle du véhicule électrique. Une légère rupture de pente, observée autour de 63 minutes, correspond à l'ouverture des portes latérales et de l'ouvrant en partie basse de la façade afin d'accélérer le désenfumage naturel du local.

5.6 Températures mesurées près du pack batterie

Les températures mesurées dans l'environnement proche du pack batterie (voir l'illustration 10 pour l'implantation des capteurs) sont tracées sur le Graphique 5.

Les signaux des thermocouples TPo1 (dessus du carter supérieur) et TPo7 (sous la face inférieure) ont été perdus rapidement.

Les thermocouples sur chaque face latérale (TPo5 et TPo6) du pack batterie présentent des variations semblables. Les températures mesurées en ces points commencent à augmenter progressivement à partir de 7 minutes environ jusqu'à atteindre 500 °C. À cet instant de l'essai, la batterie n'a pas encore été sollicitée directement sur sa face inférieure. Cette augmentation de température est donc la conséquence de l'attaque thermique de la batterie de traction par le foyer dans l'habitacle du véhicule électrique. Après 20 minutes d'essai, ces deux températures continuent d'augmenter de façon constante, mais avec une vitesse moindre que lors du début de l'essai. Des valeurs maximales de l'ordre de 800 °C sont atteintes vers 65 minutes d'essai sur la face latérale gauche du pack (TPo6) alors que les températures à l'intérieur du bâtiment sont dans une phase largement décroissante depuis la 42^{e} minute d'essai environ (soit près de 23 minutes). Cela pourrait s'expliquer par une inertie importante du pack batterie, une perte d'intégrité du pack batterie entraînant une mise en contact des thermocouples avec une zone réactionnelle ou un dégagement d'énergie (emballement) par une cellule proche de ces thermocouples.

En début d'essai (25 premières minutes), les thermocouples situés sur les disques de rupture (TPo2 et TPo3) suivent les mêmes tendances que TPo5 et TPo6. Les températures mesurées en ces deux points commencent cependant à augmenter légèrement après celles des capteurs placés sur les faces latérales, vers 11 minutes d'essai. Leur montée en température s'effectue plus rapidement que les thermocouples TPo5 et TPo6. Un plateau est atteint entre 19 et 40 minutes avec des valeurs proches de 500 °C. À 42 minutes, les températures augmentent à nouveau : sur le disque de rupture droit (TPo2), un nouveau plateau d'environ 600 °C est observé alors que sur le disque de droite (TPo3) un maximum de 850 °C est atteint après 65 minutes d'essai.

TPo3 se retrouve donc dans la même configuration que celle évoquée pour TPo6, tous deux situés sur la partie gauche du pack batterie.

5.7 Mesures de flux thermique incident

Les flux mesurés face aux véhicules électrique et thermique suivent les mêmes variations que celles décrites pour les températures dans le local. Des premiers pics à 30 et 42 kW/m^2 sont atteints vers 20 minutes lors de la combustion du véhicule électrique. Ensuite, des valeurs de l'ordre de 40 et 55 kW/m^2 sont mesurées lors de la phase où le véhicule thermique est le contributeur majoritaire du dégagement d'énergie. Enfin, lors de l'emballement thermique de la batterie (de 40 min à 41 min 30 s), des maximums de 55 et 65 kW/m^2 sont atteints.

Ces flux mesurés sont supérieurs aux valeurs classiquement retenues pour enflammer spontanément la grande majorité des polymères (bois, matières plastiques, etc.) et propager ainsi l'incendie par rayonnement.

5.8 Mesures d'oxygène, de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone

Pour rappel, la prise de gaz pour l'analyse en oxygène, monoxyde et dioxyde de carbone est située à 1,5 m de hauteur. Dans le cas où l'écoulement est stratifié dans le volume clos, les concentrations mesurées dépendent donc fortement de la position de la hauteur libre de fumée par rapport au point de prélèvement. À cet effet, un thermocouple a été associé à la canne de prélèvement afin de connaître l'ambiance dans laquelle le gaz a été échantillonné.

Dans le graphique 7 sont tracées, en fonction du temps, les concentrations en oxygène, monoxyde et dioxyde de carbone (rapportées sur l'axe de gauche des ordonnées) en parallèle de la température (axe de droite). Cette température suit globalement les mêmes tendances que le thermocouple à la même hauteur sur l'arbre 2 (voir section 5.5) : a) une phase de croissance pendant les seize premières minutes, b) un premier plateau jusqu'à la 32^e minute d'essai, c) une croissance rapide pour atteindre un second plateau jusqu'à la 47^e minute et, enfin, d) une décroissance. L'existence de ces deux plateaux permet d'avancer que la canne prélève des gaz toujours situés dans la couche de fumée. Pour rappel, il a été déterminé que, sur la phase b, une contribution majoritaire provenait du véhicule électrique puis, sur la phase c, du véhicule thermique. Les valeurs maximales atteintes lors de ces deux phases sont listées dans le Tableau 9. Sur la phase c, une déplétion en oxygène encore plus importante est observée entre 40 min et 41 min 30 s, accompagnée d'une production 1,5 fois plus élevée en monoxyde de carbone. Ces valeurs, rapportées dans la dernière ligne du Tableau 9, ne suffisent pas à elles seules à conforter la possibilité d'occurrence d'un emballement thermique d'une ou plusieurs cellules de la batterie de traction sur cette courte période de 1 min 30 s, comme évoqué dans les sections précédentes.

Tableau 9: Extremum des concentrations (%) en oxygène, monoxyde et dioxyde de carbone durant les phases b et c de l'essai

	O_2	CO_2	CO
Phase b	4,5	12	1
Phase c	3,75	13,5	1
Emballement	2,75	15	1,5

5.9 Analyses des autres gaz prélevés dans le local.

Les résultats qui suivent sont extraits de la référence [2]. Les mesures effectuées par le pôle Environnement sont comparées aux valeurs de références professionnelles.

5.9.1 Valeurs de référence

Les valeurs limites d'exposition professionnelle dans l'air des lieux de travail sont données à titre indicatif puisque, dans cette étude, il s'agit de mesures à poste fixe et non de mesure d'exposition.

Les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) sont fixées par le ministère chargé du travail. La valeur limite d'un agent chimique représente la concentration dans l'air que peut respirer une personne pendant un temps de référence déterminé, concentration en dessous de laquelle le risque d'altération de la santé est négligeable. La définition réglementaire de la VLEP donnée par le Code du travail reprend la définition fixée au niveau européen. Il s'agit de la limite de la moyenne, pondérée en fonction du temps, de la concentration d'un agent chimique dangereux dans l'air de la zone de respiration d'un travailleur au cours d'une période de référence déterminée. Au niveau réglementaire, la période de référence est soit de 8 heures (VLEP 8 heures), soit de 15 minutes (VLCT).

Les valeurs limites sont établies à partir d'informations relatives aux propriétés toxiques des substances. Ces informations sont tirées de l'expérience industrielle (observations isolées, enquêtes épidémiologiques) et d'études sur des animaux de laboratoire.

Les valeurs retenues visent à protéger des effets irritants, toxiques, etc., immédiats ou à long terme ; cependant les travailleurs ne sont pas à l'abri d'autres effets, comme les phénomènes d'allergie.

Il existe :

- des valeurs réglementaires contraignantes. Elles sont fixées par décret en Conseil d'État et intégrées à l'article R. 4412-149 du Code du travail : poussières de bois, amiante, benzène, chlorure de vinyle, plomb, quartz, etc..
- des valeurs limites réglementaires indicatives fixées par arrêté en application de l'article R. 4412-150 du Code du travail.
- des valeurs limites indicatives. Plusieurs centaines ont été publiées, entre 1982 et 1996, dans des circulaires, par le ministère chargé du Code du travail. Ces valeurs seront progressivement remplacées par des valeurs limites réglementaires indicatives ou contraignantes. Elles doivent être considérées comme des objectifs minimaux pour la prévention.

Tous les agents chimiques disposant d'une VLEP réglementaire, que cette VLEP soit de nature contraignante ou indicative, doivent faire l'objet d'un contrôle technique annuel (décret n° 2009-1570 du 15 décembre 2009 relatif au contrôle du risque chimique sur les lieux de travail).

En ce qui concerne les VLEP indicatives, le dispositif n'est pas encore entré en vigueur, bien qu'initialement prévu au 1er janvier 2012 (voir Circulaire DGT n° 2010-03 du 13/04/10 et article 13 du Décret précité).

Tableau 10: Valeur limite d'exposition professionnelle.

Agents chimiques dangereux	Type de valeur limite	VLEP 8 heures	VLCT 15 minutes
Benzène	Valeur limite réglementaire contraignante	3,25 $mg.m^{-3}$	-
Naphtalène	Valeur limite réglementaire indicative	50 $mg.m^{-3}$	-
Styrène	Valeur limite réglementaire indicative	215 $mg.m^{-3}$	-
Acide fluorhydrique	Valeur limite réglementaire contraignante	1,5 $mg.m^{-3}$	2,5 $mg.m^{-3}$
Acide chlorhydrique	Valeur limite réglementaire contraignante	-	7,6 $mg.m^{-3}$

Lorsque des EPI respiratoires sont utilisés, l'exposition contrôlée est alors celle théoriquement mesurable à l'intérieur de l'EPI. Dans ce cas, la concentration de l'agent chimique mesurée à l'extérieur de l'EPI (par prélèvement individuel) est pondérée du facteur de protection correspondant à l'EPI employé.

5.9.2 Résultats

Cette section ne concerne que les objets soumis à l'essai. Les résultats concernant les polluants majoritaires sont rassemblés dans le Tableau 11. Les résultats sont donnés dans les conditions ambiantes du parc couvert.

Il convient de noter que, lors de ces mesures, il a été constaté de fortes variations du débit dues aux suies dégagées par l'incendie. Dans ces conditions, tous les résultats sont donc donnés en valeur approchée.

La présence de bromure a été mise en évidence dans les quatre prélèvements et plus particulièrement lors de la phase n°1, au cours de l'incendie.

Tableau 11: Concentrations moyennes en $mg.m^{-3}$.

Mesure de concentration	Phase 1 durant l'incendie	Phase 2 durant l'emballement de la batterie	Phase 3 de 0 à 30 min après l'extinction	Phase 4 de 30 à 60 min après l'extinction
Date de prélèvement	03/07/13	03/07/13	03/07/13	03/07/13
Période de prélèvement	de 14 h 34 à 15 h 34	de 15 h 34 à 16 h 19	de 16 h 19 à 16 h 49	de 16 h 49 à 17 h 19
Durée de prélèvement en minutes	60	45	30	30
Volume d'air prélevé en litres	COV : 42,7 HF/HCl : 123,0	COV : 46,4 HF/HCl : 92,1	COV : 30,7 HF/HCl : 61,4	COV : 30,5 HF/HCl : 58,4
Concentration moyenne en $mg.m^{-3}$				
Benzène	**48**	**5,1**	**5,6**	**4.8**
Naphtalène	**4.9**	**0.71**	**0,63**	**0,48**
Styrène	**1,1**	**0,84**	**1,6**	**1,9**
Fluorures (Acide fluorhydrique)	**3,7**	**1,8**	**3,7**	**12**
Chlorures (Acide chlorhydrique)	**9,8**	**8,5**	**15**	**38**

5.9.3 Commentaires et conclusion

Les mesures en composés organiques volatils (benzène, naphtalène et styrène) d'une part, et en fluorures et chlorures d'autre part, ont mis en évidence :

- des concentrations importantes en COV, notamment de benzène, lors de l'incendie des véhicules (phase 1) compte tenu de la dégradation de nombreux matériaux composant ceux-ci puis une nette diminution (phase 2) et une stagnation des concentrations (phases 3 et 4) ;
- des concentrations importantes en fluorures (dont acide fluorhydrique) et en chlorures (dont acide chlorhydrique) dès la phase d'incendie (phase 1) pouvant provenir de la dégradation de nombreux matériaux composant les véhicules, mais également de l'emballement des batteries dont le phénomène n'a pas été identifié temporellement avec précision lors de l'essai. Une nette augmentation des concentrations en fluorures et en chlorures est observée après l'extinction des flammes dans les deux véhicules (phases 3 et 4). Malgré l'extinction des flammes, de fortes températures étaient toujours observées au niveau du pack batterie du véhicule électrique et des fumées s'en échappaient pouvant expliquer ces incréments.

Les mesures réalisées lors de cette étude montrent des concentrations en COV, fluorures et chlorures nettement plus importantes que lors des études réalisées sur ce type de véhicules à l'air libre.

L'exposition des équipes intervenantes après un tel sinistre est donc plus importante en milieu confiné qu'à l'air libre. Le risque d'inhalation de gaz toxiques est toujours important même après un certain laps de temps (sans système de ventilation opérationnel). Il est donc impératif que les personnes intervenantes soient équipées de matériel de protection individuel (type ARI).

5.10 Déformations de la structure

Afin de mesurer les déformations de la structure résultant des sollicitations provenant de la combustion du véhicule thermique et du véhicule électrique, deux modélisations 3D par technique laser/scanner ont été réalisées par l'IRCGN [3].

La première modélisation a été effectuée avant l'essai, lorsque les deux véhicules et les moyens de mesure étaient installés. La seconde a été faite le lendemain de l'essai une fois la température de la structure revenue à l'ambiance. Lors de cette seconde phase, les deux carcasses de voiture étaient toujours présentes dans le garage, au contraire de l'ensemble des matériels de mesure qui avaient été reconditionnés peu de temps après l'essai.

La mesure des déformations de la structure « froide » s'est donc faite par comparaison des deux modélisations 3D à l'aide d'une échelle hypsométrique. La résolution des mesures permet d'avoir environ 6 mm de précision à 10 m.

L'Illustration 18 est une reproduction du rapport de l'IRCGN. Sur celle-ci, chaque couleur correspond à une valeur de déformation, le rouge étant la déformation la plus importante et le bleu la moins importante.

Des déformations sont apparues dans différentes zones du local : coin de mur à l'arrière du véhicule électrique, murs limitrophes à ce coin de mur, plafond au-dessus du véhicule thermique, plafond au-dessus du véhicule électrique. Les valeurs maximales des déformations dans ces zones sont récapitulées dans le Tableau 12.

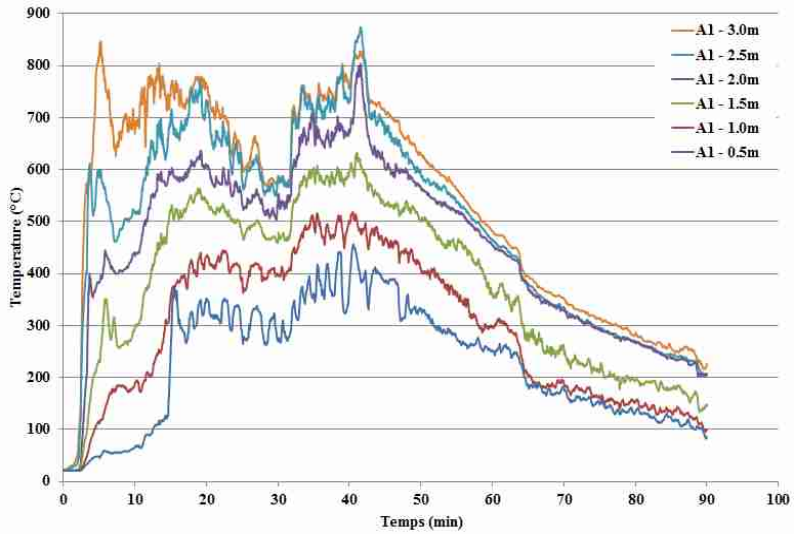
Tableau 12: Déformations maximales de la structure (cm) dans les zones les plus impactées par l'incendie.

Zones	Coin de mur à l'arrière du véhicule électrique	Murs limitrophes au coin de mur à l'arrière du véhicule électrique	Plafond au-dessus du véhicule électrique	Plafond au-dessus du véhicule thermique
Déformations maximales	≈ 2,5 cm	≈ 1,5 cm	≈ 6,5 cm	≈ 4 cm

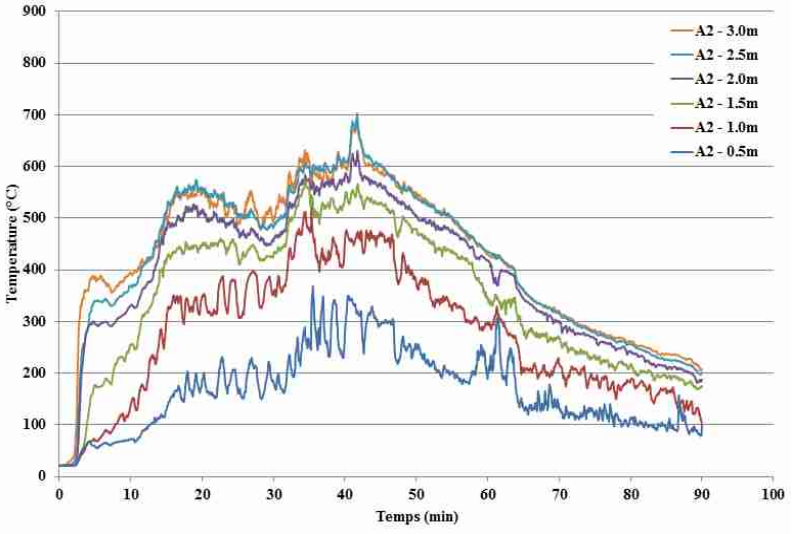
Il apparaît ainsi que la zone présentant les plus grandes déformations est le plafond situé au-dessus du véhicule électrique. Dans cette zone, elles sont de l'ordre de 6,5 cm. Cependant, la majeure partie de ces déformations est imputable à l'écaillage du plafond béton suite à l'intense sollicitation thermique et non pas à un flambement de la structure.

Un essai impliquant deux autres véhicules ayant déjà été réalisé dans le même bâtiment, les valeurs rapportées dans cette section sont donc à interpréter en conséquence.

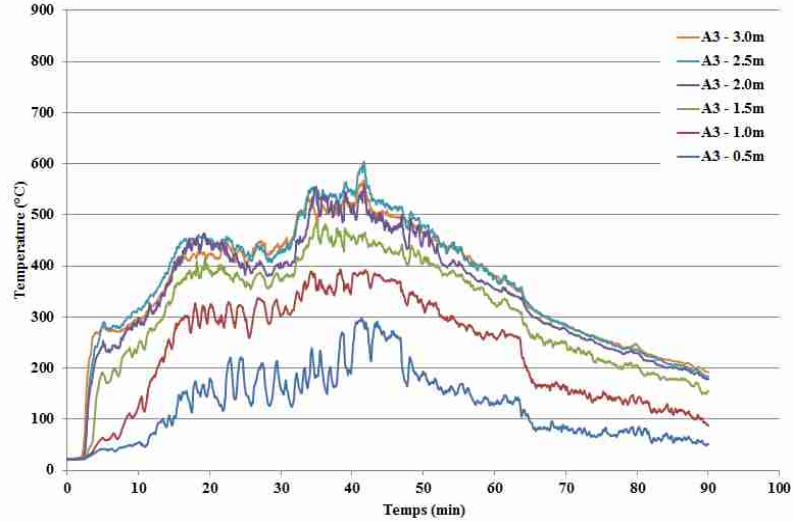
De plus, le bâtiment n'a pas au préalable été inspecté par un spécialiste de la construction. Il n'est donc pas possible d'estimer le rôle qu'ont joué les murs porteurs et les poutres dans la déformation ou la prévention de la déformation. Il n'est de ce fait pas non plus possible de généraliser les effets observés sur cette structure à tout autre type de structure semblable ou non dans la construction.



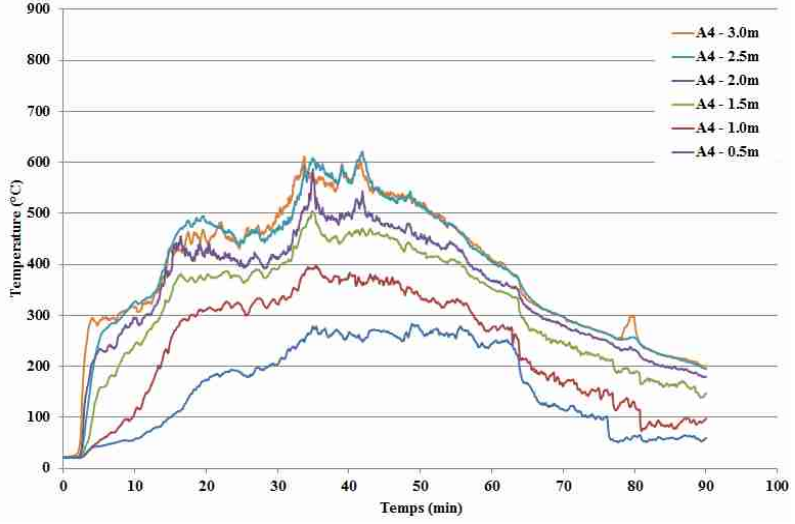
Graphique 1: Températures mesurées sur l'arbre 1 entre 0,5 et 3 m de hauteur.



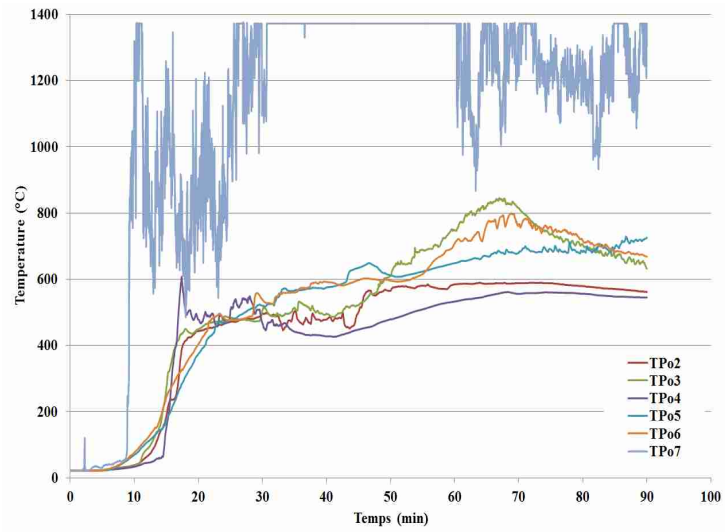
Graphique 2: Températures mesurées sur l'arbre 2 entre 0,5 et 3 m de hauteur.



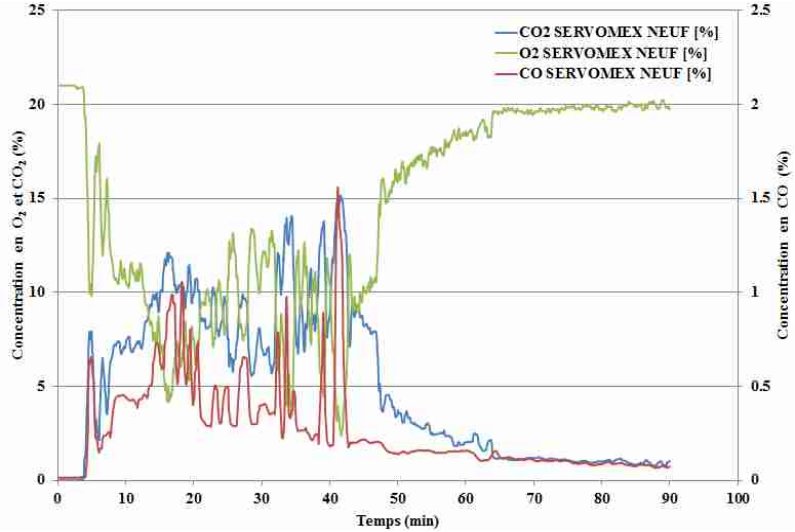
Graphique 3: Températures mesurées sur l'arbre 3 entre 0,5 et 3 m de hauteur.



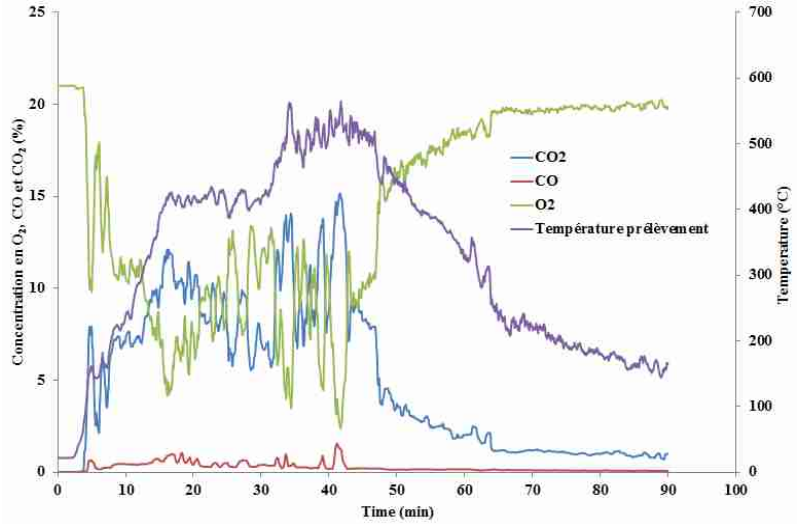
Graphique 4: Températures mesurées sur l'arbre 4 entre 0,5 et 3 m de hauteur.



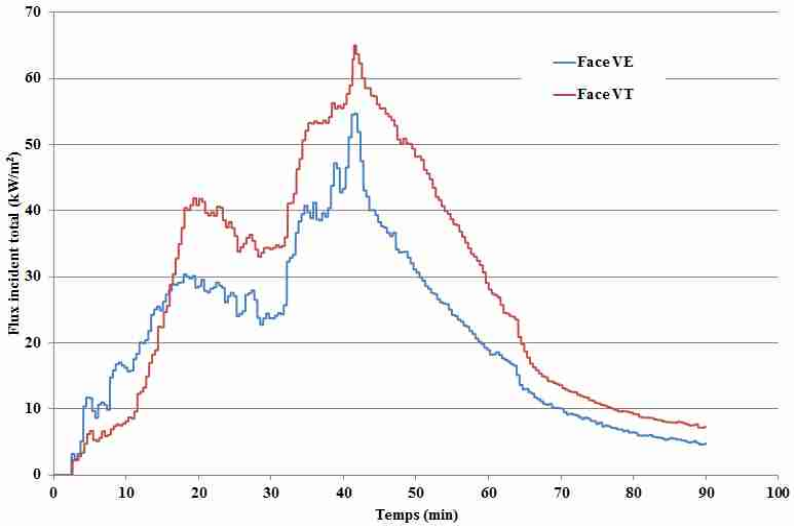
Graphique 5: Températures mesurées sur la batterie de traction.



Graphique 6: Concentrations en O_2, CO et CO_2 mesurées dans le local.



Graphique 7: Concentrations en O_2, CO et CO_2 mesurées dans le local et température enregistrée au point de prélèvement.



Graphique 8: Flux thermique incident total mesuré face aux véhicules thermique (VT) et électrique (VE).

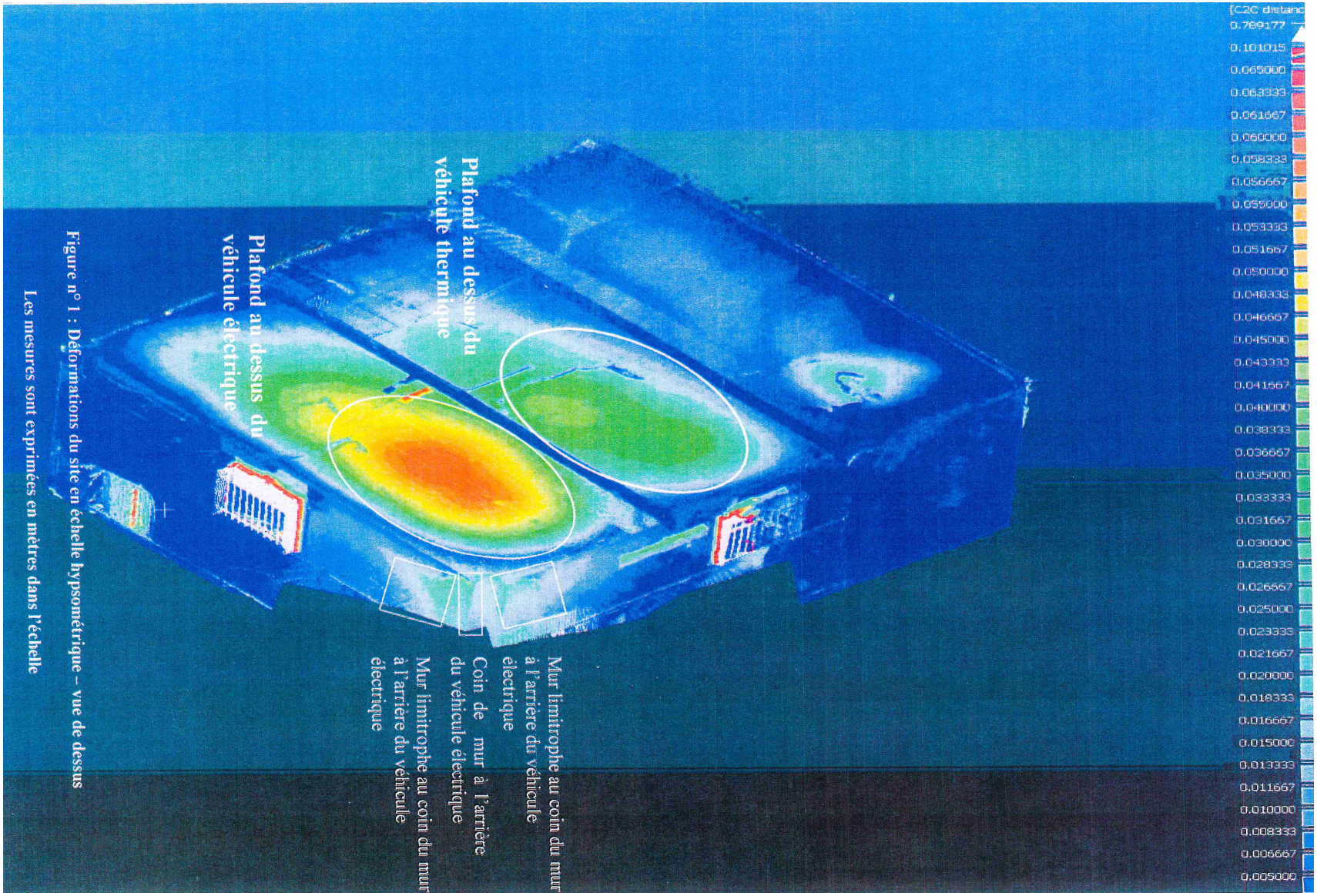


Figure n° 1 : Déformations du site en échelle hypsométrique – vue de dessus

Les mesures sont exprimées en mètres dans l'échelle

Illustration 18: Déformation de la structure béton mesurée par l'IRCGN par cartographie laser 3D [3].

6 Bilan

L'essai réalisé fait suite aux différents tests effectués à l'air libre pour lesquels l'emballement thermique de la batterie n'était pas obtenu sur un feu d'habitacle, mais uniquement en présence d'une charge de combustible supplémentaire.

La multiplication des véhicules électriques dans le parc automobile français impose d'étudier le comportement des différents types de technologie lorsqu'ils sont pris dans des incendies, en particulier dans des milieux confinés. Cette configuration ne présente pas les mêmes dynamiques de développement d'un feu ni les mêmes risques pour la structure et les services d'intervention qu'en milieu ouvert.

Le scénario retenu, tout en étant réaliste, plaçait la batterie de traction du véhicule électrique dans les conditions les plus défavorables, à savoir : un départ de feu dans le véhicule électrique suivi d'une propagation au véhicule thermique assurant ainsi une exposition prolongée d'une face de la batterie.

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.

Les mesures et observations effectuées en infrastructure permettent de constater que la destruction de ce type de véhicule par une mise de feu à l'intérieur de l'habitacle n'entraîne pas l'emballement thermique de la batterie.

Il a été constaté qu'après 23 min 30 de feu et la perte du signal vidéo, le véhicule électrique est déjà fortement dégradé et, d'après les mesures de température, l'activité de ce foyer est sur une phase de décroissance. La batterie ne montre alors aucun signe visible d'emballement.

La propagation du foyer depuis le véhicule électrique vers le véhicule thermique se produit une première fois après 7 min 20 d'essai, mais s'éteint rapidement avec la chute du rétroviseur enflammé. Une nouvelle propagation au pneu avant gauche est ensuite observée après 13 min 50 d'essai, représentant ainsi la propagation effective du véhicule électrique vers le véhicule thermique.

L'emballement de la batterie ne peut être établi avec précision. Il est probable qu'entre 40 min et 41min30 minutes d'essai l'augmentation soudaine des niveaux de températures, de flux thermiques incidents, des concentrations en monoxyde et dioxyde de carbone et la diminution de la concentration en oxygène soient synonymes d'emballement d'une ou plusieurs cellules. Même si soudaine, l'intensité de ces variations est relativement faible. Le phénomène d'emballement aurait ainsi facilement pu se confondre avec l'énergie dégagée sur la même période par les deux véhicules. Visuellement, cela s'accompagne par l'augmentation de la quantité d'effluents gazeux produits, sans qu'une couleur caractéristique ne soit associée à ces fumées.

Il n'a encore jamais été observé en extérieur pour ce type de technologie d'emballement thermique d'une durée aussi courte (1 min 30 s environ). Ainsi, il est possible que l'emballement thermique ait débuté plus tôt mais qu'il n'ait pas été détecté ou qu'il se soit poursuivi par la suite sans pouvoir le différencier de la combustion des véhicules.

Les niveaux de température et les flux thermiques incidents mesurés sont de l'ordre de ceux rencontrés pour un feu dans un volume clos de véhicules thermiques de taille équivalente.

Lors des diverses mesures menées lors d'incendies de véhicule, en milieu confiné ou non, il a été observé que les concentrations moyennes en benzène sont importantes, quel que soit le type de véhicule impliqué, et que des fluorures sont détectés de surcroît lorsqu'un véhicule électrique est concerné. Il a été montré par ailleurs lors d'essais réalisés en laboratoire par d'autres organismes que, lors d'un feu, la batterie génère très peu d'acide fluorhydrique, mais que le fluor se retrouve essentiellement dans les suies sous forme de fluorures.

Les mesures de composés organiques volatils (benzène, naphtalène et styrène) d'une part, et en fluorures et chlorures d'autre part, ont mis en évidence :

- des concentrations importantes en COV notamment benzène lors de l'incendie des véhicules compte tenu de la dégradation de nombreux matériaux composant les véhicules. Les concentrations diminuent nettement ensuite (1 heure après le début de l'essai) pour stagner à des concentrations entre 1h45 et 2h45 après la mise de feu.
- des concentrations importantes en fluorures (dont acide fluorhydrique) et en chlorures (dont acide chlorhydrique) dès la phase d'incendie pouvant provenir de la dégradation de nombreux matériaux composant les véhicules mais également de l'emballement des batteries dont le phénomène n'a pas été identifié temporellement avec précision. Une nette augmentation des concentrations en fluorures et en chlorures est observée après l'extinction des flammes dans les 2 véhicules. Malgré l'extinction des flammes, de fortes températures étaient toujours observées au niveau du pack batterie du véhicule électrique et des fumées s'en échappaient pouvant expliquer ces incréments.

L'exposition des équipes intervenantes après un tel sinistre est plus importante en milieu confiné qu'à l'air libre. Le risque d'inhalation de gaz toxiques est toujours important même après un certain laps de temps (sans système de ventilation opérationnel). Il est donc impératif que les personnes intervenantes soient équipées de matériel de protection individuel (type ARI).

En conclusion,

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 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 supplémentaire 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.

7 Références

[1] *Étude de l'impact de feux de véhicules électriques (Renault) sur les intervenants des services de secours*, Rapport d'essai sur site n° 12/815, Section Ingénierie du Feu, Pôle Mesures Physiques et Sciences de l'incendie, Laboratoire Central de la Préfecture de Police.

[2] *Évaluation des concentrations en benzène et en acide fluorhydrique lors de l'incendie en milieu confiné d'un véhicule électrique et d'un véhicule thermique, et estimation de la persistance de ces polluants*, Rapport interne n° 13/6836/PR7/RI1, Eddie Faure, Air et Mesures, Pôle Environnement, Laboratoire Central de la Préfecture de Police.

[3] *Étude de l'impact d'un feu de véhicule électrique sur la structure d'un parc de stationnement*, Rapport d'examen administratif n°6016/EA/SIP/498/13, Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale.

8 ANNEXES

ANNEXE 1 - Accord spécifique LCPP/BSPP

ANNEXE2 - Technique de prélèvement d'air

ANNEXE 3 - Mesures effectuées avec les sondes lambda

ANNEXE 4 - Températures surfaciques mesurées par camera thermique par le BfB

ANNEXE 5 - Notes prises en direct lors de l'essai

ANNEXE 6 - Chronologies extraites des enregistrements vidéo

ANNEXE 7 - Liste de présence lors de l'essai

ANNEXE 1 – Accord spécifique BSPP/LCPP

Accord Spécifique

Étude d'un feu de véhicule électrique stationné à proximité d'un véhicule thermique dans une structure béton

Introduction

Un accord-cadre a été signé entre le LCPP et la BSPP afin de définir les conditions de collaboration dans les domaines de la défense nucléaire, radiologique, biologique et chimique (NRBC), de l'incendie, de la protection de l'environnement et, enfin, des intoxications oxycarbonées. Le paragraphe 5.2 de cet accord-cadre définit comment les prestations réalisées par une Partie au profit de l'autre doivent être contractualisées. Il stipule en particulier qu'un document dénommé "accord spécifique" doit être rédigé entre les deux établissements.

C'est l'objet du présent document.

Objet de la collaboration

Le développement du parc automobile à énergie électrique, et en particulier l'usage des batteries de nouvelle génération à base de lithium (lithium-ions, lithium métal polymère, etc.), nécessite de la part des services de secours une adaptation des procédures d'intervention. Par ailleurs, l'évaluation des risques supplémentaires éventuels liés au stationnement de ces véhicules en parc de stationnement couvert devient opportune, tant sur l'extinction d'un feu que sur les postes de charge électrique associés.

Un véhicule Kangoo ZE à traction électrique est fourni pour des tests par le constructeur afin d'évaluer l'impact qu'aurait sur la batterie d'un véhicule électrique un feu de ce même véhicule électrique stationné à l'intérieur d'une structure béton à proximité d'un véhicule thermique. Les conditions de combustion et de propagation d'un feu dans une structure étant très différentes de ce qui se produit en extérieur, du fait du confinement, il est important, pour les intervenants sapeurs-pompiers, d'évaluer les problématiques existantes inhérentes au stationnement de véhicules électriques en structure ainsi que l'effet du feu sur le comportement d'une structure de stationnement couvert en béton. Le garage utilisé est situé au Mesnil Saint Denis dans les Yvelines (78).

Nature et étendue des prestations techniques et scientifiques réalisées par le LCPP

Le LCPP prévoit d'installer un ensemble de capteurs qui permettront de suivre pendant l'essai l'ambiance thermique dans le local, le dégagement de certains gaz toxiques, l'éventuelle surpression créée lors de l'emballement. Le déroulement de l'essai sera également filmé.

Ainsi, seront installés par le LCPP :

- Trente et un thermocouples dans le local,
- quatre caméras CCD pour filmer l'essai, deux à l'intérieur du local et deux à l'extérieur,
- un point de mesure gaz à l'intérieur du local pour les concentrations en fluorures et COV,

des résultats. Les destinataires des résultats et rapport s'interdisent toute communication à des tiers et/ou toute publication sans l'accord préalable écrit du LCPP.

Pour le LCPP, à Paris le

Le chef du Pôle
Mesures physiques et sciences de l'incendie

Patrick PINEAU

Pour la BSPP, à Paris le 24 juin 2013

Le colonel Gilles MALIE
sous-chef d'état-major
chef de la division formation

La sécurité de tous les intervenants pendant l'expérimentation est placée sous l'autorité de l'officier du SDIS 78 chargé du pilotage de l'opération en coopération avec la BSPP.

Nature et contenu des fournitures attendues

Le LCPP fournit à la BSPP, pour un usage interne, les différents enregistrements vidéo et photo ainsi qu'un rapport d'étude. Ces résultats, hors rapport d'étude commun, restent la propriété intellectuelle du LCPP. Ils doivent être utilisés en accord avec les clauses de confidentialité signées avec les partenaires du projet.

La BSPP fournit au LCPP les différents enregistrements photo et vidéo effectués et participe, si nécessaire, à la rédaction du rapport d'étude lorsque sollicité par le LCPP.

Échéancier des tâches

- L'installation sur site est à réaliser le 2 juillet dans la journée et 3 juillet 2013 matin.
- L'essai est à réaliser le 3 juillet 2013 après-midi, avec un allumage prévu à 14h00.
- La désinstallation est à réaliser le 4 juillet 2013 après l'essai.

Le rapport du LCPP est à communiquer à la BSPP dans un délai de deux mois maximum.

Exploitation des résultats

Les résultats des mesures sont la propriété exclusive du LCPP qui s'engage à les diffuser à la BSPP. La LCPP les diffusera également à l'ensemble des participants à l'essai, à savoir, pour le présent projet, le SDIS 78, l'IRCGN et Renault, cela en respectant et informant sur les règles d'utilisation

ANNEXE 2 - Technique de prélèvement d'air

Mesure des COV (notamment benzène)

Les mesures des concentrations en COV sont réalisées par méthode active à l'aide de tube contenant du charbon actif.

Le prélèvement d'un volume connu d'air sur le support spécifique a été réalisé grâce à une pompe régulée en débit.

Débit : environ 1000 mL/min Durée : de 30 à 60 minutes selon les essais

Les analyses sont effectuées en différé au laboratoire par chromatographie en phase gazeuse – détection FID après désorption du tube de charbon actif au disulfure de carbone.

Un blanc terrain par série de mesures est soumis à l'analyse afin de valider les conditions de conservation, d'installation et d'analyse des prélèvements. Des blancs laboratoires sont également analysés afin de valider la phase d'analyse.

Les analyses sont réalisées dans les délais de conservation des échantillons.

Mesure des fluorures et des chlorures

Les mesures des concentrations en fluorures et en chlorure sont réalisées par méthode active à l'aide d'un filtre en fibre de quartz imprégné de carbonate de calcium.

Le prélèvement d'un volume connu d'air sur le support spécifique a été réalisé grâce à une pompe régulée en débit.

Débit : environ 2000 mL/min Durée : de 30 à 60 minutes selon les essais

Les analyses sont effectuées en différé au laboratoire par chromatographie ionique.

Un blanc terrain par série de mesures est soumis à l'analyse afin de valider les conditions de conservation, d'installation et d'analyse des prélèvements. Des blancs laboratoires sont également analysés afin de valider la phase d'analyse.

Les analyses sont réalisées dans les délais de conservation des échantillons.

ANNEXE 3 - Mesures effectuées avec les sondes lambda

Les sondes lambda sont utilisées dans l'industrie automobile afin de déterminer la richesse du mélange air/essence dans un moteur à explosion. Si le mélange est trop riche en essence, alors la sonde lambda, qui est placée dans le flux des gaz d'échappement, envoie un signal au calculateur qui réduira la proportion d'essence. Si, au contraire, le mélange est trop riche en air, alors la sonde envoie un signal au calculateur qui va augmenter l'apport en essence dans le moteur. Pour que la combustion soit optimale, il faut que le mélange air/essence soit effectué dans des proportions stœchiométriques pour un combustible donné.

La sonde lambda est composée de deux électrodes microporeuses de platines séparées par de l'oxyde de zirconium dopé à l'oxyde d'yttrium. Une électrode de platine est située du côté extérieur de la sonde en contact avec les gaz d'échappement de la voiture et l'autre électrode en platine est située du côté intérieur de la sonde qui correspond au gaz de référence qui est l'air ambiant. L'oxyde de zirconium a la particularité d'être perméable aux ions O^{2-} lorsque sa température atteint 350°C. Le signal envoyé au calculateur automobile est donc une tension, générée par la réaction d'oxydoréduction suivante :

$$O^2 + 4e^- = 2O^{2-}$$

D'après l'équation de Nernst, la différence de potentiel que l'on mesure aux bornes de la sonde est :

$$V_s = \frac{RT}{4F} \times \ln\left(\frac{Pression partielle O_2 air}{Pression partielle O_2 echappement}\right)$$

La différence de potentiel est donc dépendante de la pression partielle de dioxygène dans les gaz analyses.

Une utilisation détournée du système est à l'étude par la section MPIIDF afin de pouvoir multiplier les points de mesure en oxygène dans le dispositif expérimental.

Après plusieurs campagnes de validation en laboratoire, la configuration plus complexe de cet essai au Mesnil Saint Denis a été choisie afin d'estimer les difficultés nouvelles inhérentes à l'utilisation de ces capteurs dans des conditions d'essai moins maîtrisables.

Deux sondes lambda ont ainsi été installées comme indiqué dans la section 4.4. La canne de prélèvement d'une des deux sondes a été placée à côté du point où la concentration en oxygène est mesurée avec un analyseur paramagnétique afin de confronter les résultats obtenus par la sonde lambda à un système de mesure robuste, éprouvé et reconnu. Ces concentrations mesurées sont tracées dans le graphique 19.

Il est important de noter que l'acquisition de la tension a été réalisée toutes les 48 secondes pour la sonde lambda contre 1 seconde pour le signal de l'analyseur de gaz. Considérant cela, il n'est donc pas possible pour la sonde lambda, dans cette configuration, de suivre l'ensemble des variations obtenues par l'analyseur.

Une bonne adéquation est trouvée entre les deux méthodes de mesure sur les 10 premières minutes d'essai. De 10 à 35 minutes, la sonde lambda sous-estime la concentration d'environ 3 % d'oxygène. Enfin, jusqu'à la perte du signal de la sonde après 43 minutes d'essai, les deux mesures donnent à nouveau des résultats comparables.

Il n'avait pas été disposé de filtre fritté au niveau du point de prélèvement ce qui pourrait expliquer, en partie, les différences observées entre les deux méthodes de mesure. Ce filtre est utilisé afin de prévenir un encrassement de la canne de prélèvement par les aérosols de combustion modifiant ainsi le débit (et éventuellement la nature) des gaz atteignant la sonde.

Les valeurs mesurées par la seconde sonde lambda montrent quelques incohérences à partir de 20 minutes d'essai. Cela pourrait s'expliquer par la proximité de la sonde avec la zone réactionnelle et par le vieillissement de la sonde suite aux nombreux essais de validation.

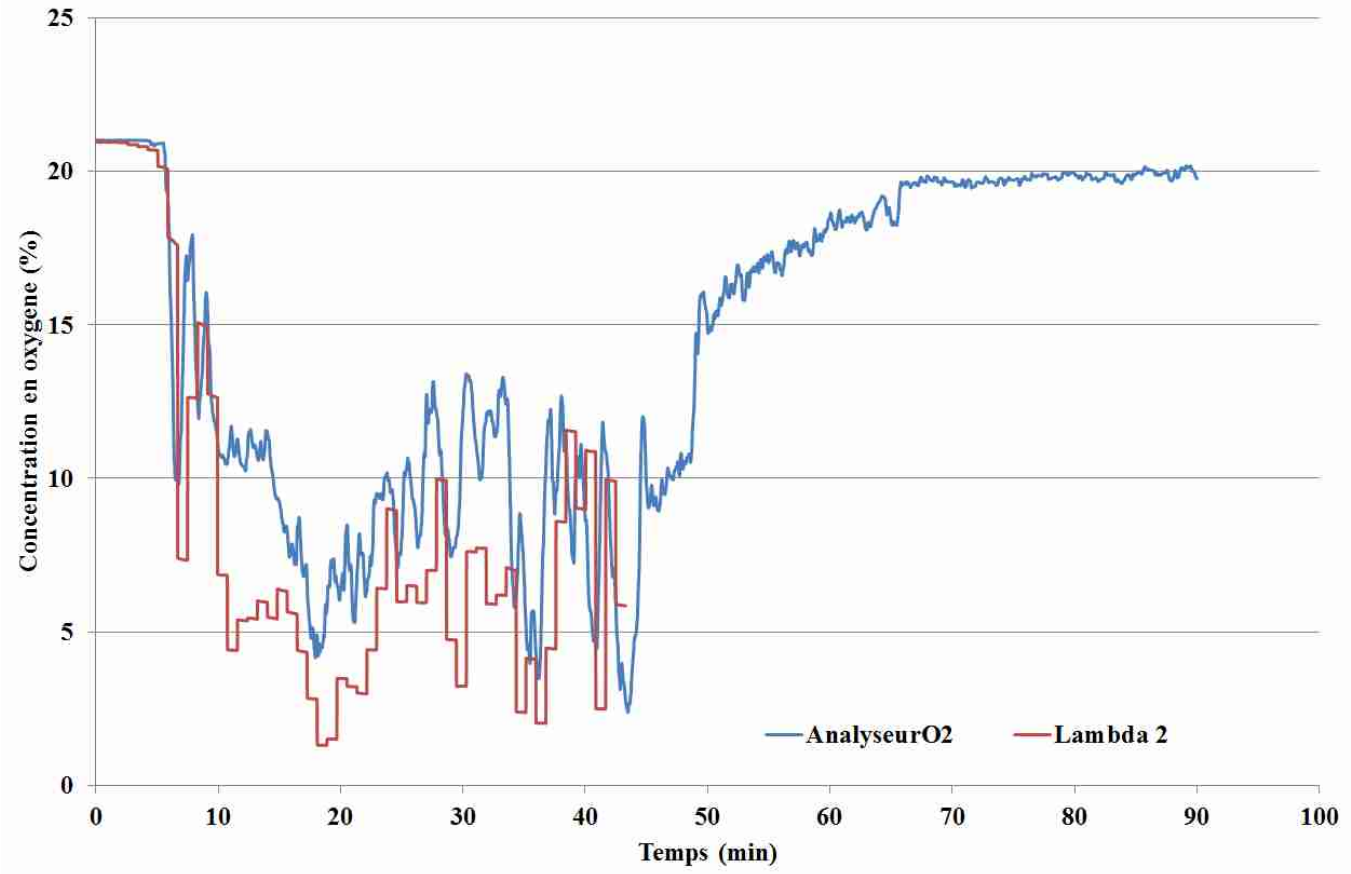


Illustration 19: Confrontation des concentrations en oxygène (%) mesurées avec un analyseur paramagnétique (bleu) et une sonde lambda (rouge) en un point fixe à l'intérieur du local.

ANNEXE 4 - Températures surfaciques mesurées par camera thermique par le BfB

Les images enregistrées grâce à une camera thermique par le Buro fur Brandschutz lors de l'essai sont présentées dans cette section.

Pour rappel, les valeurs de température rapportées ici sont des grandeurs surfaciques. De plus, elles varient légèrement avec l'émissivité des matériaux. Ces températures sont donc à considérer avec les précautions associées à ce type de technologie.

	Avant le début de l'essai, la température de l'extérieur de la structure est comprise entre 23 et 25 ºC pour les parois latérales et 33 ºC pour le plafond.
	La caméra thermique permet de déterminer les zones de fuite : par les fenêtres obstruées sur les faces droite et arrière du bâtiment, par les deux ouvertures de la face gauche et au-dessus des portes métalliques en face avant. Comme illustrée par cette vue, la température extérieure des portes avant augmente plus rapidement que celle des murs (à cause de la bonne conduction de la chaleur dans le métal et de l'isolation des murs). La zone constituée par ces portes est clairement identifiée comme un puits énergétique pour l'intérieur de la structure.
	Environ 10 minutes après le début de l'essai, la température extérieure de la dalle plafond n'a pas sensiblement augmentée.

	Après une vingtaine de minutes d'essai, des fuites commencent à être visibles dans le coin supérieur arrière droit du bâtiment.
	La structure interne de la dalle plafond commence à apparaître à la caméra thermique.
	Après une trentaine de minutes d'essai, la partie extérieure de la dalle supérieure n'a pas une température uniforme. Cependant, la caméra thermique ne permet pas de quantifier avec précision les variations de température entre les zones.

	Près d'une heure après le début de l'essai, les premières augmentations de température sont visibles sur l'extérieur du bâtiment avec des zones autour de 40 ºC. Les foyers se trouvent alors dans leur phase de décroissance.
	Cette vue à la fin de l'essai permet de localiser les zones de la structure les plus sollicitées par l'incendie.

ANNEXE 5 - Notes prises en direct lors de l'essai

Tableau 13: Observations notées au cours de l'essai.

Minutage	*Heure*	*Événement*
-	14:33:00	Lancement de l'acquisition
00:00:00	14:34:40	t_0 - Allumage
00:01:56	14:36:36	Flammes sortent de l'habitacle du Kangoo ZE
00:03:50	14:38:30	Propagation des flammes vers le véhicule thermique (rétroviseur de la polo)
00:04:54	14:39:34	Ouverture latérale (temps approximatif)
00:05:56	14:40:36	Fermeture porte latérale
00:06:20	14:41:00	Ouverture porte latérale
00:07:10	14:41:50	Debut de propagation vers le véhicule thermique (bruit d'explosion) / fermeture porte
/	/	Ouverture porte latérale
00:09:30	14:44:10	Fermeture porte latérale
00:09:57	14:44:37	Bruit d'explosion localisé vers le côté de la Kangoo ZE
00:10:23	14:45:03	ouverture porte + exutoire face arrière
00:10:46	14:45:26	Fermeture porte latérale
00:11:12	14:45:52	Bruit d'explosion
00:12:14	14:46:54	Bruit d'explosion + remise en place volet sur l'exutoire
00:13:05	14:47:45	Bruit d'explosion
00:13:36	14:48:16	Bruit d'explosion (localise vers le pneu du Kangoo ZE)
00:14:12	14:48:52	Ouverture porte latérale
00:14:38	14:49:18	Fermeture porte latérale
00:16:40	14:51:20	Ouverture porte latérale
00:17:20	14:52	Réelle propagation vers le véhicule thermique
00:18:35	14:53:15	Bruit d'explosion
/	/	Fermeture porte latérale
00:20:12	14:54:52	Ouverture porte latérale
00:21:59	14:56:39	Fermeture porte latérale
00:22:48	14:57:28	Perte de la webcam et de la caméra dirigée vers la KangooVE
00:23:58	14:58:38	Perte de la caméra située entre les deux véhicules
00:28:20	15:03	Bruit non-identifié dans le parking (sifflement)
00:31:20	15:06	Grosse flamme au niveau de l'ouvrant du local en face arrière, la porte latérale montre des signes de dégradation
00:32:20	15:07	Bruit d'explosion
00:33:25	15:08:05	Début de fissure dans le plafond
00:42:40	15:17:20	Fermeture porte latérale

00:46:45	15:21:25	Ouverture porte latérale
00:47:50	15:22:30	Fermeture porte latérale
00:48:00	15:22:40	Ouverture porte latérale
00:49:30	15:24:10	Arrosage de la porte latérale
00:52:20	15:27	Arrosage de la porte latérale puis porte laissée ouverte (bloquée par un parpaing) en maintenant un arrosage régulier
01:03:00	/	Installation d'une webcam à l'intérieur de la structure
01:03:39	15:38:19	Ouverture en grand de la porte latérale (exutoire sans volet)
01:28:37	16:03:17	Fenêtre face latérale cassée (côté parking)

ANNEXE 6 - Chronologies extraites des enregistrements vidéo

Tableau 14: Déroulement de l'essai depuis la camera placée face au véhicule électrique.

	t_0 : allumage de la pâte à feu répandue sur le siège avant du véhicule électrique. La porte latérale côté passager est maintenue ouverte.
	t_0 + 1 min 30 s : de légères flammes commencent à sortir par la fenêtre avant côté conducteur laissée ouverte après l'allumage.
	t_0 + 1 min 45 s : la taille des flammes visibles par la fenêtre augmente et le sommet intermittent de la flamme semble maintenant dépasser le toit du véhicule.

	t_0 + 1 min 55 s : fort halo lumineux dans l'habitacle avec des flammes qui augmentent à l'intérieur du véhicule et par la fenêtre avant côté conducteur.
	t_0 + 2 min : la taille de la flamme continue d'augmenter alors que le dégagement gazeux à l'intérieur du véhicule électrique s'accélère.
	t_0 + 2 min 5 s : le nuage gazeux produit par la pyrolyse des matériaux s'enflamme violemment et des flammes sortent maintenant largement par la porte latérale ouverte côté passager du véhicule électrique. En moins de 20 secondes, un feu localisé sur le siège avant s'est propagé à l'ensemble de l'habitacle, largement ventilé.

	t_0 + 2 min 30 s : la taille des flammes sortant de chaque côté des fenêtres continue d'augmenter et ont maintenant approximativement la même taille.
	t_0 + 3 min : la taille des flammes continue d'augmenter et la flamme sortant côté conducteur progresse vers l'avant du véhicule après avoir été défléchi par la paroi latérale du local. De la matière enflammée en fusion commence à être visible au sol à l'aplomb de la porte latérale ouverte.
	t_0 + 3 min 30 s : de la matière enflammée continue à s'accumuler lentement entre les deux véhicules à l'aplomb de la porte latérale côté passager. Les flammes commencent à se propager à la protection de la fenêtre côté droit du bâtiment. L'intensité du feu sur le véhicule électrique ne faiblit pas.

	t_0 + 3 min 45 s : le fort rayonnement des flammes provoque la thermolyse des joints au niveau de la porte conducteur du véhicule thermique.
	t_0 + 4 min : la thermolyse au niveau du véhicule thermique augmente avec une forte production de gaz de décomposition depuis l'intérieur du véhicule. Le plafond de fumée dans le volume augmente et la hauteur libre de fumée descend progressivement jusqu'à se trouver approximativement au niveau du toit du véhicule thermique. De légers amas de matière enflammée sont visibles au sol côté conducteur.
	t_0 + 4 min 30 s : le plafond de fumée se stabilise alors que la fonte du rétroviseur conducteur s'accélère.

	t_0 + 5 min 30 s : les flammes, toujours localisées à l'intérieur du véhicule électrique, se sont maintenant aussi déplacées vers l'avant avec une propagation sur le capot et le phare avant gauche. La plaque de protection de la fenêtre droite du bâtiment est enflammée sur quasiment toute sa surface. Le véhicule thermique continue de largement thermolyser.
	t_0 + 7 min : les flammes se sont maintenant propagées à l'ensemble de la surface du capot. Toujours aucune attaque thermique du véhicule n'est visible à partir du sol.
	t_0 + 7 min 15 s : une brusque augmentation du volume flamme est visible à partir de l'habitacle du véhicule électrique. Cela peut être attribué à l'explosion d'un équipement sous pression (système d'armement de l'airbag par exemple).

	t_0 + 7 min 16 s : le phénomène d'explosion décrit précédemment a pour conséquence de propager les flammes au véhicule thermique en enflammant la forte production de gaz de thermolyse évoquée précédemment. Plusieurs amas de matière enflammée provenant du véhicule électrique sont dorénavant visibles à plusieurs endroits au sol. Ils ne sollicitent cependant pas encore directement la batterie de traction par sa face inférieure.
	t_0 + 8 min : les flammes se propagent rapidement à l'intérieur de l'habitacle du véhicule thermique. Elles sortent maintenant par l'ensemble de la fenêtre conducteur.
	t_0 + 9 min : le rétroviseur conducteur du véhicule thermique goutte enflammé sur l'aile en direction du pneu avant gauche. La couche de fumée se stabilise autour de la moitié du pare-brise des deux véhicules.

	t_0 + 9 min 30 s : la quantité de matière enflammée au sol continue d'augmenter, particulièrement entre les deux véhicules.
	t_0 + 9 min 57 s : nouvelle brusque augmentation du volume de flamme, encore une fois attribuable à l'explosion d'un élément sous pression, à l'intérieur de l'habitacle.
	t_0 + 10 min : l'explosion évoquée précédemment n'a eu cette fois que peu de conséquence visible sur le développement du feu.

	t_0 + 10 min 45 s : les matières enflammées situées au sol ont provoqué l'inflammation du pneu arrière gauche.
	t_0 + 10 min 57 s : augmentation soudaine du volume de flamme côté conducteur entre le véhicule électrique et le mur. Cela est potentiellement dû au percement du pneu avant conducteur. Il est observé un changement dans la dynamique des fumées à l'intérieur du volume.
	t_0 + 11 min 11 s : légère, mais brusque augmentation du volume des flammes entre le véhicule thermique et le véhicule électrique. À cet instant, il est possible de distinguer quelques flammes au niveau de la carrosserie du véhicule thermique mais les flammes sortant par la fenêtre avant ont largement diminué par rapport aux instants suivant la propagation à partir du véhicule électrique. Sur le véhicule thermique, les flammes se sont propagées au pneu avant gauche.

	t_0 + 12 min 13 s : brusque et forte augmentation du volume de flamme à partir de l'avant gauche du véhicule électrique engendrant un mouvement de ce dernier. Il est probable que cela soit la conséquence d'une explosion du pneu côté passager.
	t_0 + 12 min 20 s : cette explosion n'a pas eu de conséquence visible sur la propagation du foyer.
	t_0 + 13 min : les flammes se propagent vers l'avant du véhicule sur le capot. Plusieurs foyers sont dorénavant visibles sur le sol notamment sur le pneu avant gauche côté conducteur.

	t_0 + 13 min 5 s : explosion vers l'arrière du véhicule électrique avec projection de matière enflammée. Cela n'a aucun effet visible immédiat sur le développement du foyer.
	t_0 + 13 min 35 s : brusque augmentation du volume de flamme sur le côté droit du véhicule électrique (côté passager).
	t_0 + 13 min 39 s : pendant la courte durée de ce phénomène, le flux thermique incident sur le pneu avant gauche du véhicule thermique augmente accélérant la combustion de ce dernier.

	t_0 + 14 min 2 s : Chute sur le sol du pare-chocs avant et d'une partie du capot du véhicule électrique. La taille du foyer constitué par le véhicule électrique continue d'augmenter progressivement avec une large zone enflammée au sol suite à la chute et/ou la fonte des matériaux plastiques.
	t_0 + 14 min 46 s : le pare-chocs avant et la calandre du véhicule électrique chutent encore un peu plus vers le sol, entrant en contact avec l'arbre à thermocouple A1.
	t_0 + 15 min 30 s : l'ensemble du véhicule électrique est maintenant embrasé. Les flammes sur l'avant du véhicule ont tendance à s'incliner vers le mur droit du bâtiment, illustrant la dynamique des fluides à l'intérieur du local avec une oxygénation majoritaire du foyer en provenance de la gauche du bâtiment où se trouvent les ouvertures vers l'extérieur.

	t_0 + 16 min 45 s : l'intensité du foyer est stable au niveau du véhicule électrique alors que les flammes sur l'avant gauche du véhicule thermique gagnent en intensité.
	t_0 + 17 min 30 s : sur le véhicule électrique, l'intensité du feu a diminué à l'intérieur de l'habitacle et la majorité des flammes est maintenant située sur l'avant et l'arrière de la caisse. Le foyer ne cesse de se propager sur le véhicule thermique.
	t_0 + 18 min : le plafond de fumée descend à l'intérieur du local accompagné par une perte de visibilité en partie basse. Cela est la conséquence d'une fermeture de la porte latérale du bâtiment.

	t_0 + 19 min 30 s : le plafond remonte progressivement dans le local et l'intensité du foyer sur le véhicule électrique augmente légèrement.
	t_0 + 21 min : par manque de combustible, l'intensité du foyer situé sur le véhicule électrique décline légèrement et, par conséquent, les hauteurs de flammes. Sur le véhicule thermique, les flammes continuent à se propager.
	t_0 + 22 min 30 s : dernières images avant la perte du signal vidéo. L'intensité du feu de véhicule électrique continue de décliner alors que les flammes progressent sur le véhicule thermique.

Tableau 15: Déroulement de l'essai depuis la camera placée à l'extérieur du bâtiment avec vue sur la face avant et latérale droite.

	t_0 + 1 min 40 s : de la fumée commence à s'échapper de la face avant par l'interstice situé entre les portes et la structure du bâtiment. La partie inférieure de la porte avant gauche est maintenue légèrement ouverte.
	t_0 + 2 min 30 s : la quantité de fumées augmente progressivement et elles commencent à sortir par la fenêtre côté droit du bâtiment.
	t_0 + 3 min 30 s : la couleur des fumées est différente selon la face du bâtiment dont elles proviennent. Celles sortant par la fenêtre latérale, provenant majoritairement de la combustion de la planche en bois et des matériaux obstruant l'ouverture, sont plus blanches et moins denses que celles sortant en façade, principalement produites par la combustion du véhicule électrique.

	t_0 + 5 min : la quantité de fumée produite continue d'augmenter et la différence de couleur continue d'exister.
	t_0 + 10 min : la quantité de fumées s'échappant par la face avant semble constante alors qu'elle augmente légèrement à travers la fenêtre latérale. La différence de couleur entre les fumées existe toujours.
	t_0 + 15 min : des petites flammes sortent par intermittence par la fenêtre latérale, l'obstruction n'étant plus efficace.

	t_0 + 17 min 30 s : des fumées commencent à sortir dans le coin arrière gauche entre le mur et le plafond béton. La partie inférieure de la porte avant gauche est partiellement refermée afin de modifier l'oxygénation du foyer.
	t_0 + 27 min 1 s : la quantité de fumée s'échappant par les faces avant et gauche a largement diminué.
	t_0 + 37 min 39 s : fermeture complète du battant en partie basse de la porte avant gauche du bâtiment.

	t_0 + 40 min : la quantité de fumée s'échappant par les faces avant et gauche recommence à augmenter.
	t_0 + 41 min 30 s : le battant en partie basse de la porte avant gauche du bâtiment est légèrement ouvert afin de modifier l'oxygénation du foyer.
	t_0 + 50 min : à nouveau, peu de fumées s'échappent par la face avant et latérale droite.

	t_0 + 1h : la quantité de fumées se dégageant par l'ensemble des ouvertures du volume a largement diminué.
	t_0 + 1h 3 min 21 s : la partie basse de la porte avant gauche est maintenue ouverte jusqu'à la fin de l'essai.
	t_0 + 1h 3 min 21 s : la production de fumée reste constante et est très faible par rapport aux pics de production pendant l'essai.

	t_0 + 1h 40 min : la production de fumée est maintenant très faible, mais suffisante pour supposer que des flammes persistent encore dans le bâtiment.
	t_0 + 1h 48 min 31 s : des flammes résiduelles sont toujours supposées être présentes dans le bâtiment, même lorsque les caméras sont arrêtées et que l'essai est considéré comme terminé.

ANNEXE 7 - Liste de présence lors de l'essai

Liste de présence
03 juillet 2013
Site de Sully commune du Mesnil St Denis

Je soussigné *par ma présence à ces essais, m'engage à respecter une clause de confidentialité consistant à conserver de manière strictement confidentielle les éléments portés à ma connaissance lors de cet essai du 3 juillet 2013, les manœuvres observées et leurs résultats, tant que Renault ne m'aura pas donné l'autorisation de les divulguer. Je m'engage également à ne faire aucune photo ou prise de vue de l'essai en cours. ».*

NOM	PRENOM	SOCIETE	FONCTION	Emargement
LABADIE	Olivier	SDIS78	Chef de groupement	
CALADO	Pedro	SDIS78	Coordinateur entre services	
DEHOORNE	Anthony	SDIS78	Responsable fourgon incendie	
DUPUIS	Alexandre	SDIS78	Manœuvrant	
GUILBERT	Thierry	SDIS78	Manœuvrant	
BRIET	Laurent	SDIS78	Manœuvrant	
MORIZOT	Stéphane	SDIS78	Officier sécurité	
CRUZ-MOREY	William	SDIS78	Bureau opérations	
SCHMIT	Hugo	SDIS78	Bureau opérations	
LEPOURIEL	Stephan	DGSCGC		
POUTRAIN	Bruno	BSPP	Etudes opérationnelles	
SADON		BSPP	Bureau prévention	
NAIM	Yoram	SDIS91	Groupe zonal de désincarcération	
GENTILLEAU	Michel	SDIS86		
PETIT-BOULANGER	Claire	Renault		
THOMAZO	Jacques	Renault		

NOM	PRENOM	SOCIETE	FONCTION	Emargement
~~MION~~	~~François~~	~~Renault~~		
MANNEBARD	Laurent	Renault		
~~LEGRAND~~	~~Eric~~	~~Renault~~		
AZMI	Bruno	Renault		
BARREAU	Christian	Renault	Conseiller technique	
GIBOUIN	Bruno	Renault	Conseiller Technique	
STEIN	Klaus	Renault		
LENORMAND	Hervé	Renault		
MARIE	Julien	Renault	PSA Batterie	
BLAISOT	Jean Luc	Renault	SRP	
SUZANNE	Mathieu	LCPP	Ingénieur	
BAZIN	Hervé	LCPP	Chef de section	
TRAORE	Adissa	LCPP	Technicien	
DREUILLE	Nicolas	LCPP	Technicien	
DUPONT	Sylvie	LCPP	Technicien	
TRAMONI	Jean-Baptiste	LCPP	Stagiaire	
SAYADA	Raphael	LCPP	Stagiaire	
RIERA	Camille	LCPP	Doctorante	
MIMOUNI	Laure	LCPP	Chef de section	
FARGETTE	Bruno	LCPP	Directeur	
FAURE	Eddie	LCPP	Ingénieur	
LE BARS	Patrick	LCPP	Ingénieur	
BESANCON	Sophie	LCPP	Stagiaire	
RICH	Celia	LCPP	Doctorante	
THELOT	Denis	DTPP		
FOLACCI	Françoise	DTPP		
DUCELIER	Thierry	IRCGN		
COGNON	Guillaume	IRCGN		
DAUDIGNY	Hervé	IRCGN		
THIRY	AURÉLIEN	LCPC	Ingénieur	
~~RIAOUT~~	~~LAURE~~			
MULLER	ANNE	LCPP		
MONTI	Marc	BSPP	BEP →	
Bellivier	Axel	LCPP	ADJ	
GUINOT	Jean	LCPP	ingénieur	
DEBIASI	Francis	BSPP		
DEMANDRE	Aymeric	BSPP		
DECLUSEAU	Laurent	CG 78	Gestionnaire	
CAQUEZ	Laurent	Renault		

NOM	PRENOM	SOCIETE	FONCTION	Emargement
TRIVIDIC	Marc	BSPP/CNRBC	Off adjoint	
BERTON	David	BSPP / CNRBC	chef de garde	
KOLTCHINE	Serge	SDIS77	DDA	
CHARLIER	Damien	BSPP/CCPC	BL SR	
LANFRANCA	Jérôme	BSPP/CPC	Pdt Sbsdt	
GAUDARD	Olivier	BSPP/BRP	chef BPN	
PRESLES	Bernard	SDIS 78	Bureau SAP	
TRUTTMANN	Michel	BSPP / CAT	adjoint territorial	