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

Étude de l'impact de feux de véhicules électriques (RENAULT) sur les intervenants des services de secours

réalisée le 2 avril 2012

au centre de formation des cadres de la BSPP

Fort de la Briche, Saint-Denis (93)

Révision 00 – Édition du 02/04/2012

Rédigé le 13/03/2012 **par:**		**Validé le** 02/04/12 **par:**	**Approuvé le** 02/04/12 **par:**
Hervé BAZIN (MPI-IDF) Patrick LE BARS (MPI-ECE) Véronique EUDES, Frédéric LAVOLEE, Magali Bigourie (ENV-LES) Eddie FAURE (ENV-AIM)	 8.1 8.2 8.3	Le chef du pôle MPI Patrick PINEAU	Le chef de section MPIIDF Hervé BAZIN

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

Sommaire

1 Introduction 4
2 Objet 4
3 La batterie Lithium-ion 4
3.1 Technologie 4
3.2 Risques chimiques 5
4 Site et dispositif expérimental 6
5 Protocole d'essai 6
6 Installation des matériels et du poste de mesure 7
7 Programme de la journée 9
8 Organisation des essais et résultats 9
8.1 Mesures de températures 9
8.2 Mesures électriques 31
8.3 Essais concernant les prélèvements d'eaux et les frottis : 35
8.4 Analyses des gaz prélevés près des intervenants 40
9 Bilan 46
10 ANNEXE 49
10.1 Résultats des analyses d'eaux et du frottis 49

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.), 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.

Le LCPP et la BSPP unissent leurs compétences, à travers une convention, pour apporter des réponses dans le domaine du feu au développement des nouvelles technologies. L'opportunité offerte par le constructeur RENAULT de permettre à la BSPP d'évaluer la spécificité des automobiles électriques a incité la BSPP à associer le LCPP dans ses travaux pour apporter une plus-value scientifique. Ainsi, RENAULT a fourni quatre véhicules à traction électrique pour effectuer des tests sur le terrain d'entraînement du Centre de Formation des Cadres (CFC) du Fort de la Briche à Saint-Denis (93).

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

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

2 Objet

L'objet des essais est d'évaluer la température des différentes zones d'un véhicule en feu, la propagation vers les organes de puissance électrique, les températures atteintes dans l'environnement proche, la concentration des gaz produits dans l'environnement et près des voies respiratoires d'un intervenant, et la nature des polluants dissous dans les eaux d'extinction.

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

3 La batterie Lithium-ion

3.1 Technologie

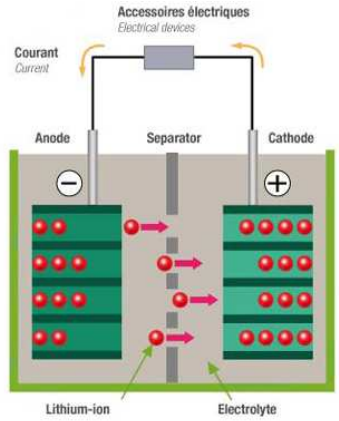
Les véhicules électriques Renault, utilisés pour les tests, sont équipés d'une batterie composée de 48 modules de puissance, disposés en deux rangées côte à côte. Chacun de ces modules comprend 4 cellules élémentaires. Les 4 cellules de chacun de ces modules délivrent 8,4V, soit 400V en courant continu pour la totalité des 48 modules composant la batterie. Elles n’ont pas d’effet mémoire de charge, ne nécessitent aucun entretien et conservent entre 80 % et 100 % de leur capacité sur une durée de six ans en moyenne

»[1]. Elles fonctionnent sous une température interne de 80 °C environ.

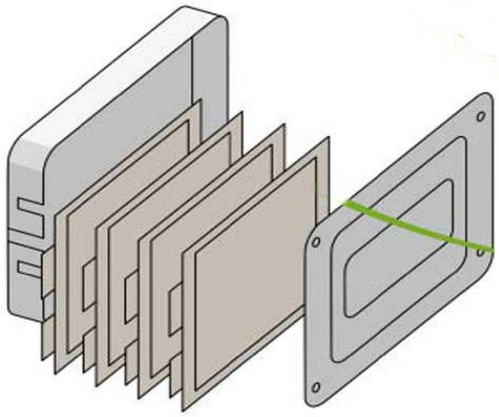
Le système de charge est raccordé à une prise du réseau de distribution public de 220V en courant alternatif avec une intensité de 10A ou 16A qui permet de recharger le véhicule en 6 heures à 8 heures. Un

1 : Site http://voituredufutur.autodeclics.com/

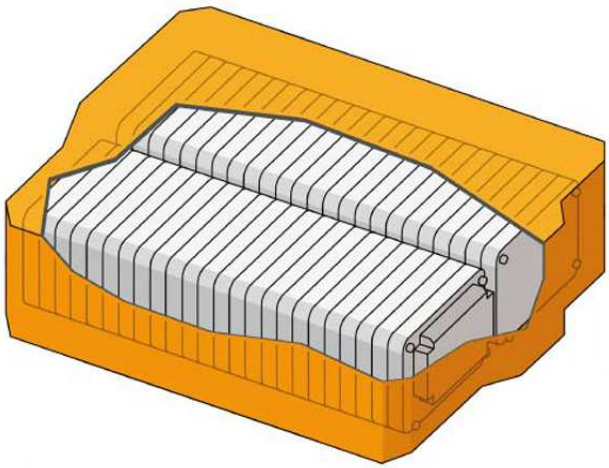
remplacement de la batterie sera possible grâce aux stations d'échange rapide de batteries. Une charge rapide avec une prise 400V pouvant aller de 32A à 63A triphasés permettra, à terme, de recharger une batterie en 20 à 30 minutes selon l'intensité fournie [source Renault]**.** Le courant alternatif est transformé par l'intermédiaire d'un convertisseur interne en courant continu pour être emmagasiné dans les cellules électrochimiques des batteries.



cellule élémentaire *(illustration Renault)*



module élémentaire (8,4V) composé de 4 cellules *(illustration Renault)*



pack batterie complet avec 2x24 modules, 20 kWh, 400V *(illustration Renault)*

carter de fixation du pack batterie sur le véhicule[2].

3.2 Risques chimiques

Ci-dessous, un extrait d'un rapport d'étude de l'INERIS sur les risques spécifiques liés à ce type de véhicule[3] :

2 : Source http://voituredufutur.autodeclics.com/?p=2284

« Les batteries Li-ion combinent la mise en œuvre d'électrodes fortement oxydantes et réductrices en contact avec un électrolyte organique inflammable. Les électrodes, notamment l'électrode positive, peuvent devenir instables à des températures élevées (> 200 °C). De plus, les solvants composant l'électrolyte possèdent des pressions de vapeurs relativement importantes à de
s températures modérées.
Des conditions inhabituelles et/ou abusives d'utilisation (surcharge, court-circuit, présence d'une source de chaleur extérieure …) peuvent donc provoquer des augmentations brutales de température pouvant conduire à des feux, explosions ou dégagements de produits toxiques. La température à l'intérieur d'une cellule est déterminée par l'équilibre entre la chaleur générée et celle dissipée par celle-ci. Lorsqu'une cellule atteint une certaine température (en général de l'ordre de 130 à 150 °C), des réactions chimiques exothermiques se produisent entre les électrodes et l'électrolyte, ce qui contribue à augmenter d'autant plus la température. Si la chaleur produite ne peut pas être dissipée suffisamment par la cellule, les réactions s'accélèrent alors, provoquant une augmentation rapide de la température, pouvant conduire au phénomène d'emballement thermique. Les batteries ont une faible capacité à dissiper la chaleur et sont donc fortement sujettes à l'emballement thermique.
La pression générée par la vaporisation de l'électrolyte peut ensuite conduire à des défaillances mécaniques à l'intérieur de la cellule pouvant provoquer la rupture de son enveloppe extérieure.
Cette perte de confinement est alors à l'origine de fuite de l'électrolyte, produit toxique, inflammable et corrosif, sous forme liquide, mais également gazeuse. Les vapeurs ainsi générées et mélangées avec l'air peuvent alors former une atmosphère explosive (ATEX). Celle-ci est susceptible de s'enflammer au contact d'une source d'inflammation du type étincelle ou surface chaude, souvent présente à l'intérieur d'un véhicule. Il en résulte alors une explosion provoquant des effets thermiques et des effets de pression.
De plus, les sels d'électrolyte tels que l'hexafluorophosphate de lithium LiPF6, le tetrafluoborate de lithium LiBF4, le perchlorate de lithium LiClO4, l'hexafluoroarsenate de lithium LiAsF6 peuvent dégager des fumées particulièrement toxiques et corrosives contenant du phosphore, du fluor et du lithium. Des essais réalisés à l'INERIS [Paillart A. DRA 95. Opération II.B : Batteries/Supercapacités. Les agents extincteurs utilisés dans le cadre d'incendie de batteries Lithium ion. Ref DRA-09-101610-15503A-2009.] ont ainsi montré la formation d'acide fluorhydrique (HF) lors de la dégradation thermique de batteries Li-ion.... »
« En cas de chauffage externe, l'emballement thermique est inéluctable, quel que soit l'état de charge électrique de la batterie, si la source de chauffage externe n'est pas interrompue à temps. »

4 Site et dispositif expérimental

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

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

5 Protocole d'essai

Un protocole d'essai a été préalablement rédigé pour :

- définir les processus et mesures à réaliser ;
- répertorier les matériels nécessaires ;

3 : INERIS, RAPPORT D'ÉTUDE 06/06/2011 DRA-10-111085-11390D - Approche de la maîtrise des risques spécifiques de la filière véhicules électriques.

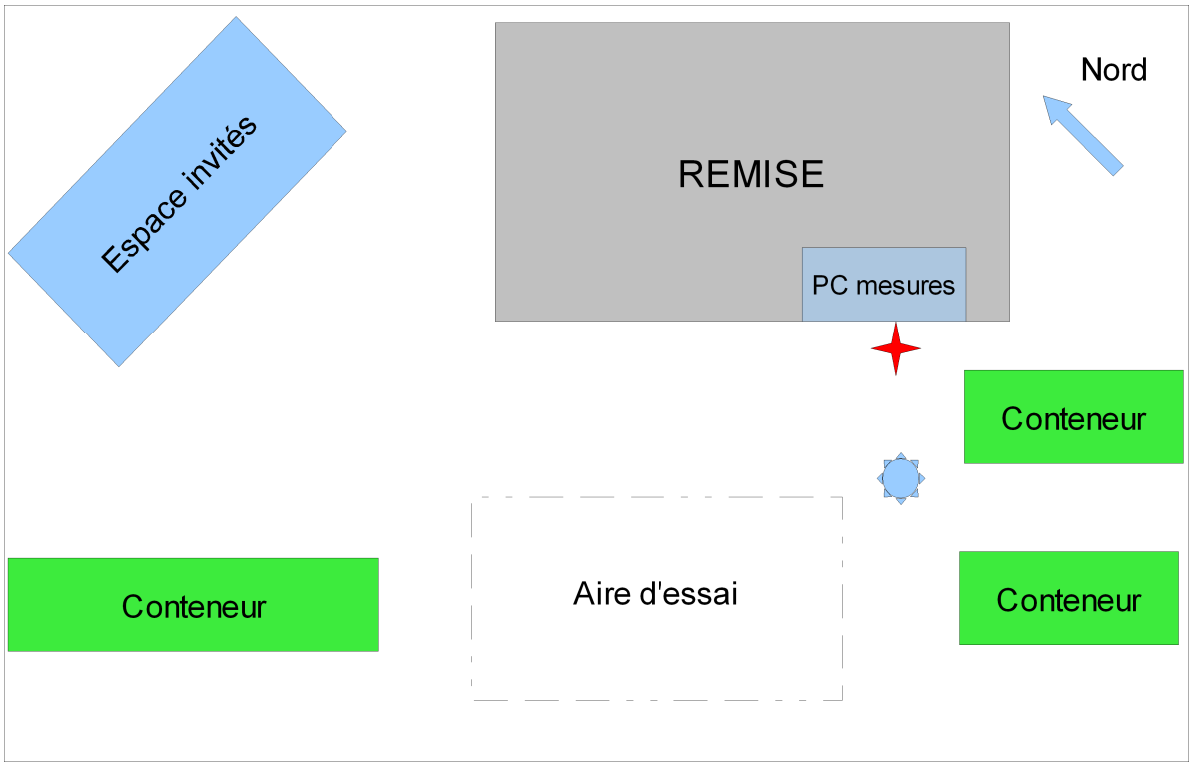
- répartir les missions des personnels du LCPP impliqués ;
- décrire les séquences d'un essai.

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

6 Installation des matériels et du poste de mesure

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

Plan schématique du site



Vidéo

- aucune caméra n'a été installée à la demande du constructeur des véhicules (Renault);

Thermobarohygromètre

- le thermobarohygromètre utilisé pour le relevé des conditions initiales et finales d'essai était placé entre l'aire d'essai et la remise.

Station météo

- une station de relevés de la vitesse et de l'orientation du vent a été implantée entre l'aire d'essai et les conteneurs situés en fond de parcelle.

Prélèvement d'air

zones respiratoires

- deux mesures d'exposition sur deux sapeurs-pompiers lors de chaque essai, et une mesure dans l'air ambiant pendant la phase d'extinction (sauf essai n°3, pendant la phase d'incendie et d'extinction) à environ 15 m du véhicule ont été effectuées à l'aide de pompes autonomes.

Prélèvement d'eau d'extinction

- 1 prélèvement après chaque feu de véhicule sur les eaux d'extinction récupérées dans le regard (zone tampon de récupération d'eau) de l'aire d'essai ;

- 1 prélèvement dans l'enceinte du bloc batterie. Lors de l' absence d'eau à cet emplacement, un prélèvement par frottis a été effectué. Lorsque les batteries du véhicule n'étaient pas détruites, aucun prélèvement n'a été réalisé à ce niveau ;

- 2 prélèvements de "blancs" avant le début des essais. Ils correspondent à des prélèvements d'échantillons témoins :

  - 1 blanc d'eau d'extinction prélevé en sortie de lance incendie des sapeurs pompiers,

  - 1 blanc terrain - prélèvement d'eau dans le regard de la zone d'essai après rinçage de celle-ci.

Sur l'ensemble de ces prélèvements, différentes déterminations ont été projetées, à savoir des mesures de pH sur site et des recherches de COV, de métaux, d'anions et de cations en laboratoire.

Thermocouples (ou ThC)

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

Caméra thermique

- la caméra était mise en œuvre manuellement par un opérateur pour des clichés vers le véhicule en fonction des évènements constatés ;

Brûleur

- pâte à feu (de couleur banche) sur les sièges pour les essais 1 et 2 ;
- pour l'essai 3, de la pâte à feu sur les sièges et sur les palettes ajoutées au véhicule, et un brûleur au gaz manuel sur les palettes de bois situées au sol ;
- pour l'essai 4, de la pâte à feu sur les sièges et sur les palettes ajoutées au véhicule.

7 Programme de la journée

- 9 h : installation des équipements de mesure
- 11 h 30 : vérification des capteurs
- 12 h : fin de l'installation
- de 13 h à 19h30 : Essais 1 à 4 (n°4 n'a pas fait l'objet de mesures)

Conditions ambiantes

	T en °C	Hgr (%)	P. atmo. (hpa)	V min vent (m/s)	V moy. vent (m/s)	V max vent (m/s)	Dir. moy. vent (°) Nord à 0°
Essai 1: ZOE	9,8	73	1017	0,26	1	2,7	221
Essai 2: Kangoo	9,8	73	1017	0,26	1,7	5,4	282
Essai 3: Kangoo	9,8	83	*1015,5	0,3	1,1	2,6	291

*Conditions météorologiques : pluie légère.

8 Organisation des essais et résultats

8.1 Mesures de températures

L'exploitation des valeurs mesurées permet d'identifier des séquences significatives dans la cinétique de feu de chaque véhicule en fonction du scénario adopté.

Chaque séquence identifiée est portée sur le graphique et développée. Les observations visuelles ou sonores sont succinctement résumées et données à titre indicatif.

Essai n°1 véhicule ZOE

Découvert au moment de sa mise en place sur l'aire d'essai, ce véhicule faisait l'objet de conditions particulières de confidentialité du fait d'une présentation prochaine au salon de Genève. Ayant subi les essais de crash-test, il était dépourvu du capot avant, les côtés et l'arrière étaient enfoncés et la vitre arrière était brisée. L'ensemble batterie est situé à l'arrière du véhicule, sous le coffre de chargement.

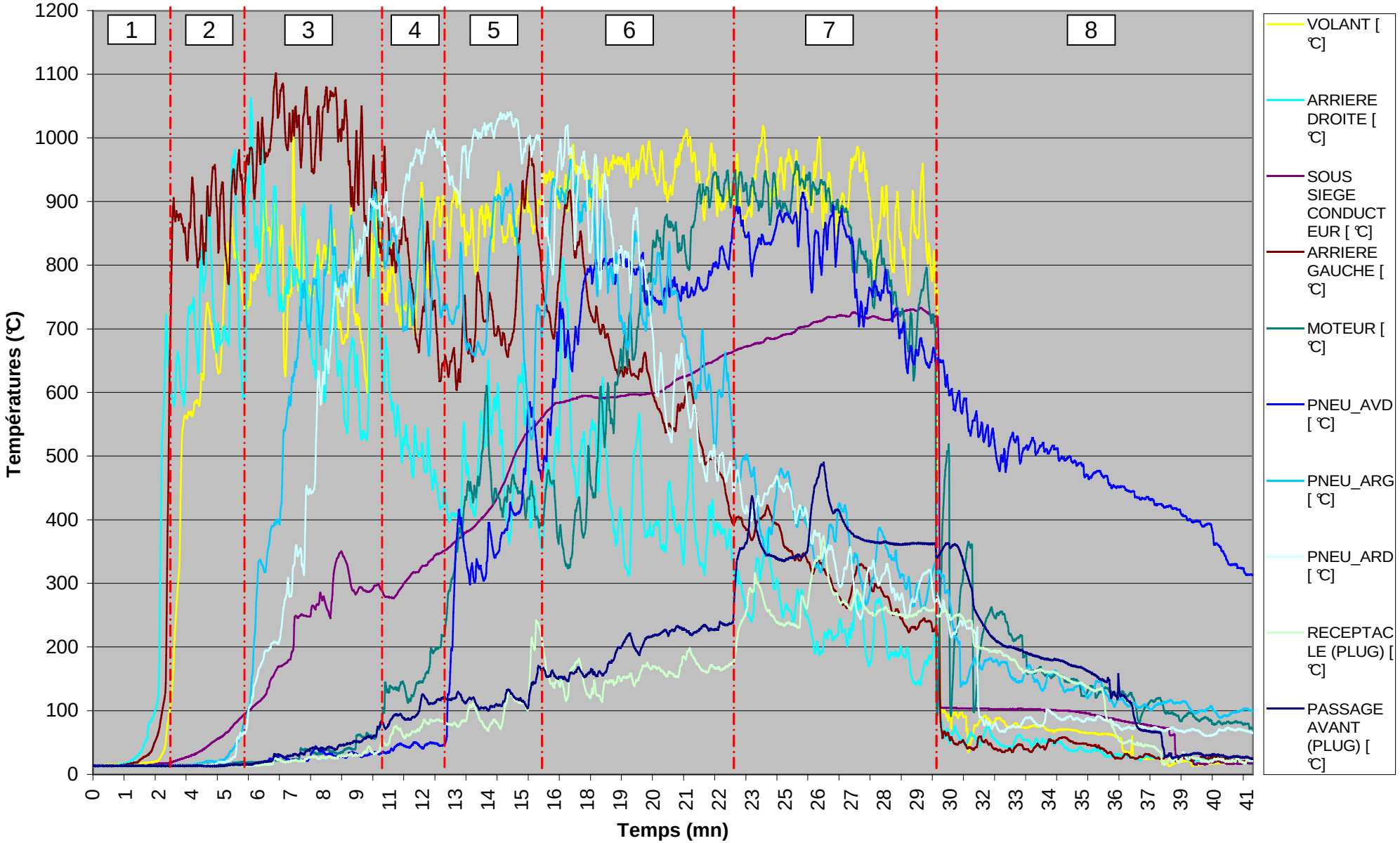
vue de dessus (*image: site internet Renault*)	vue du bloc batterie

Position des thermocouples

Nom du capteur dans le fichier de résultat	Fixation du capteur sur
VOLANT	le volant de direction
ARRIÈRE DROIT	l'appui-tête du siège arrière droit
SOUS SIÈGE CONDUCTEUR	sous l'assise du siège conducteur
ARRIÈRE GAUCHE	l'appui-tête du siège arrière gauche
MOTEUR	le compartiment moteur, près du tablier
PNEU_AVD	l'amortisseur avant droit
PNEU_ARG	l'amortisseur arrière gauche
PNEU_ARD	l'amortisseur arrière droit
RÉCEPTACLE (PLUG)	le plug[4] de la batterie à l'arrière gauche du véhicule
PASSAGE AVANT (PLUG)	le dessus du « plug » avant, dans le coffre situé sous le plancher du siège passager (sous trappe métallique).

La mise de feu a été effectuée à l'aide de pâte à feu sur le siège arrière droit. La nature exacte de la pâte à feu, qui se présente sous forme d'un solide pâteux, est inconnue. Les vitres avant sont ouvertes et la vitre arrière est brisée.

4 : Le « plug » représente la prise destinée à isoler la batterie des circuits du véhicule



- **Essai n°1** - graphique de résultat des mesures thermiques réalisées sur le véhicule **ZOE**

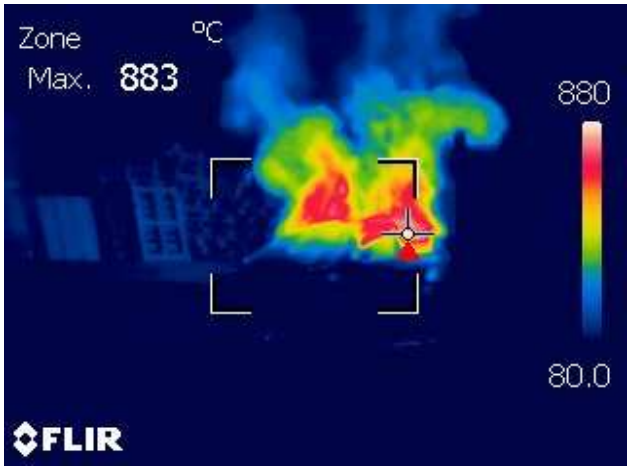
Début d'essai à 13 h 25 mn 49 s

- *Séquence 1 (allumage à t_0 + 3 min)*

La mise de feu étant réalisée sur le siège arrière droit, la croissance de la température est enregistrée sur les capteurs installés sur les appuis-tête des sièges arrière, puis très rapidement sur celui associé au volant. Un pic à 900 °C apparaît à t_0 + 3 min. Les capteurs situés dans le compartiment moteur ou à l'extérieur du véhicule ne sont pas impactés.

- *Séquence 2 (de 3 min à 5 min)*

Le feu affecte tout l'habitacle et le capteur situé sous le siège conducteur atteint 100 °C en fin de séquence. Le rayonnement entraîne la montée en température des capteurs fixés sur les amortisseurs arrière.



vue thermographique à t_0 + 3 min 40 s

Observations :

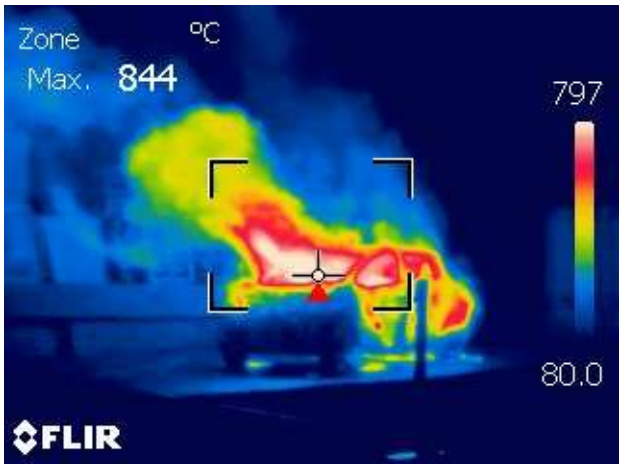
à partir de t_0 + 2 min, le pare-brise se perce, suivi d'une première explosion. Une deuxième explosion est perçue vers t_0 + 4 min 40 s.

Il est à noter que toutes les explosions mentionnées dans le document sont imputables notamment à des éléments sous pression comme les airbags, les amortisseurs de roues ou de hayons, les prétensionneurs des ceintures de sécurité, pneumatiques, etc.

Leur origine exacte n'est pas connue dans la plupart des cas.

- *Séquence 3 (de 5 min à 10 min 30 s)*

La combustion est contrôlée par les matériaux combustibles de l'habitacle et les températures atteignent 1 100 °C. Elle est en phase de décroissance dans la partie arrière, zone de départ de feu. Le dessous du siège conducteur croît en température proportionnellement à la destruction des matériaux qui l'isolent du rayonnement. La propagation vers les éléments extérieurs du véhicule est visible essentiellement au niveau des amortisseurs arrière est imputable à l'inflammation des pneumatiques. Le compartiment moteur et le boîtier « Plug » du coffret situé sous le plancher passager commencent à subir les effets thermiques ainsi que l'amortisseur avant droit et l'environnement immédiat de la batterie (autour de 70 °C).



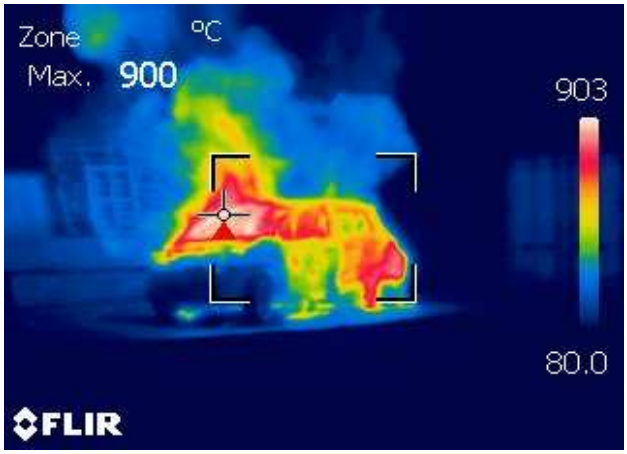
vue thermographique à t_0 + 9 min 40 s

Observations :

vers t_0 + 6 min, les pneumatiques arrière s'enflamment. Une nouvelle explosion est entendue à t_0 + 8 min, suivie d'une autre 30 secondes plus tard et une autre à t_0 + 9 min 40 s.

- *Séquence 4 (de 10 min à 12 min)*

La décroissance du feu en partie arrière de l'habitacle se poursuit alors que la partie avant continue de croître. Cette croissance est à relier à la charge combustible du tableau de bord et des éléments de contrôle du véhicule. Les pneumatiques arrière continuent de brûler. Le dessous du siège conducteur est de moins en moins protégé par ce siège. Les gaz chauds passent dans le compartiment moteur et les éléments extérieurs à l'avant et près de la batterie dépassent la température de 100 °C.



vue thermographique à t_0 + 11 min 40 s

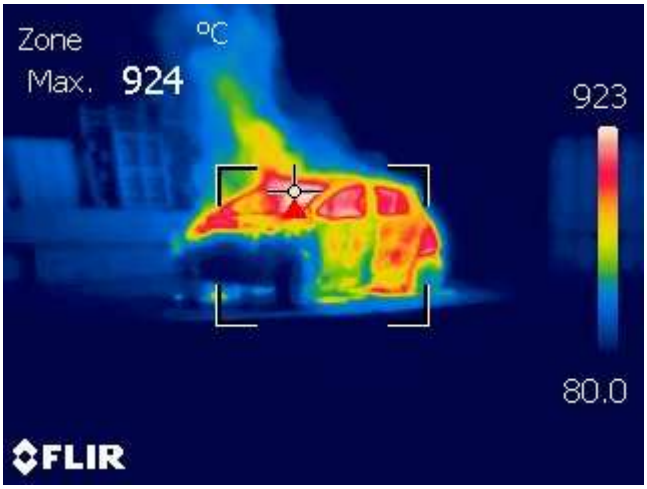
observations :

vers t_0 + 10 min, on distingue une nouvelle explosion, suivie d'une autre une minute plus tard.

- *Séquence 5 (de 12 min à 16 min)*

La croissance du feu à l'avant de l'habitacle entraîne une remontée des températures à l'arrière de l'habitacle par rayonnement. Les pneumatiques arrière continuent de brûler. Le dessous du siège

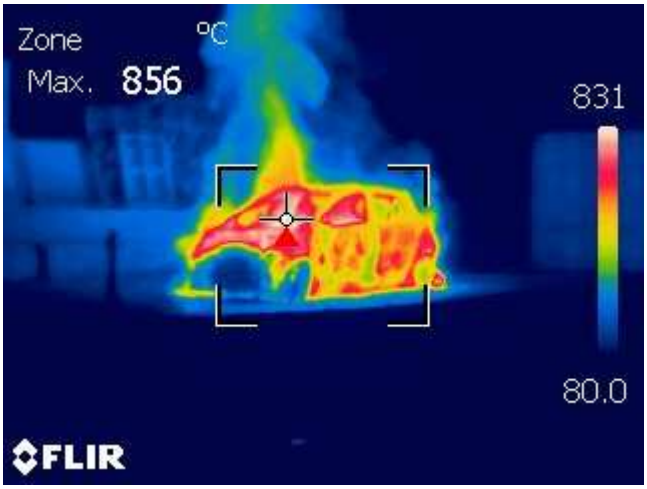
conducteur atteint la température de 550 °C. Les flammes affectent le compartiment moteur et le pneumatique avant droit. Les éléments liés à la batterie (« plugs » avant et arrière) montent sensiblement en température (environ 120 °C).



vue thermographique à t_0 + 14 min 40 s

- *Séquence 6 (de 16 min à 23 min)*

La combustion de l'avant de l'habitacle est stable et contrôlée par le combustible. Les températures à l'arrière de l'habitacle sont de nouveau en décroissance. Les pneumatiques arrière sont de plus en plus détruits et sont également en phase de combustion décroissante. Le dessous du siège conducteur atteint les 650 °C. Les flammes affectent les éléments du compartiment moteur et le pneumatique avant droit est en feu. Le « plug » avant dépasse la température de 230 °C et celui de la batterie se stabilise vers la température de 170 °C.



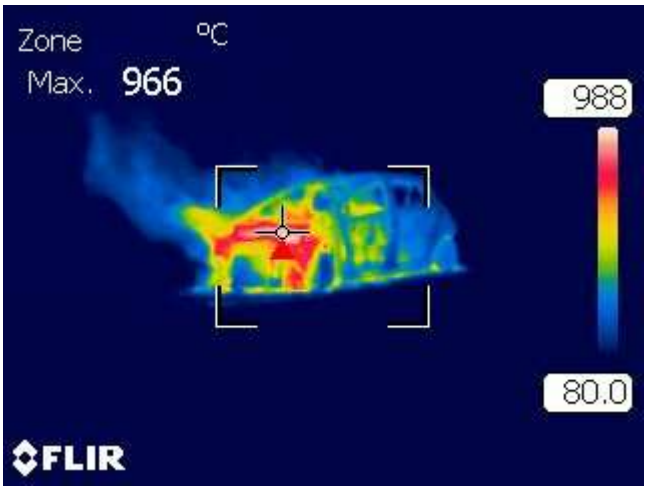
vue thermographique à t_0+18 min 40 s

observations :

vers t_0 + 14 min, le pneumatique avant droit s'enflamme. Une explosion est entendue dans le même temps, suivie d'une autre 3 minutes plus tard. Le compartiment moteur est en feu.

- *Séquence 7 (de 23 min à 30 min)*

Les températures à l'arrière de l'habitacle continuent de décroître. Les pneumatiques arrière sont en fin de combustion. Le dessous du siège conducteur atteint la température de 720 °C. Les flammes affectent toujours les éléments du compartiment moteur et le pneumatique avant droit. Le « plug » avant dépasse la température de 360 °C et celui de la batterie est en moyenne de 270 °C.



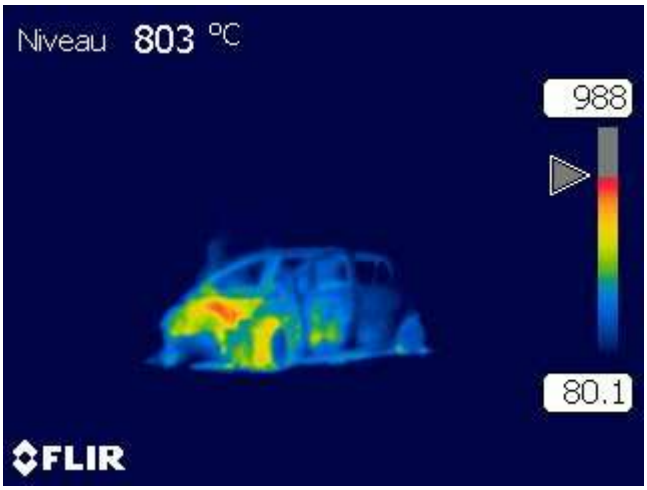
Vue thermographique à t_0+23 min 40 s

observations :

Toutes les parties avant (moteur, pneumatique, habitacle) sont en feu. Une dernière explosion est perçue vers t_0 + 23 min.

- *Séquence 8 (de 30 min à 41 min - fin des mesures)*

Procédure d'extinction. Les températures chutent brutalement. Des crépitements sont visibles sur le côté droit du plancher côté conducteur. Il s'agit de la combustion du moyeu en alliage de magnésium du volant. Des flammes de couleur bleue/verte s'échappent des orifices supérieurs du coffrage de la batterie. Ces colorations indiquent une combustion de la batterie. L'introduction d'eau à l'aide de la lance d'incendie par ces orifices permet de refroidir suffisamment l'intérieur pour arrêter la combustion. L'emballement thermique est évité et les flammes disparaissent. Les températures du « plug » de la batterie diminuent sensiblement. L'extinction est obtenue dans les mêmes conditions qu'un véhicule à moteur thermique.



vue thermographique à t_0 + 28 min 40s

vue thermographique à t_0 + 39 min 40 s

Essai n°2 véhicule KANGOO ZE

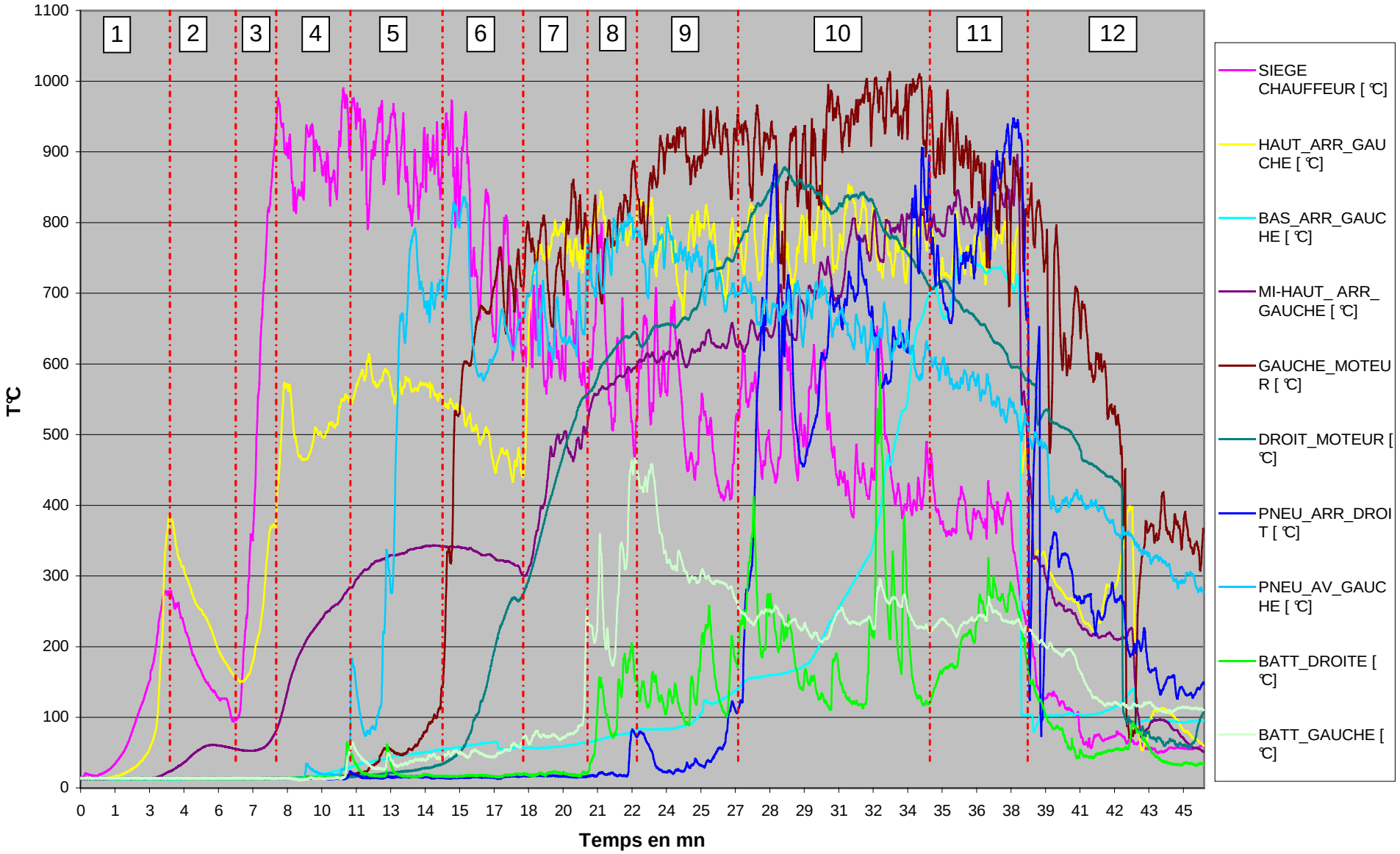
Il s'agit d'un véhicule neuf totalisant 23 km. La fiche technique du véhicule n'a pas été fournie. L'ensemble batterie est situé à l'arrière du véhicule, sous le coffre de chargement qui était rempli de palettes de bois.

vue de ¾ avant (*image du site internet Renault*)	vue de côté (*image LCPP*)

Position des thermocouples

Nom du capteur dans le fichier de résultat	Fixation du capteur sur
SIÈGE CHAUFFEUR	l'appui-tête conducteur
MI-HAUT_ARR_GAUCHE	la carrosserie, à mi-hauteur coffre arrière, à mi-distance entre avant et arrière
BAS_ARR_GAUCHE	la carrosserie, au sol du coffre arrière, à mi-distance entre avant et arrière
HAUT_ARR_GAUCHE	la carrosserie, en plafond du coffre arrière, à mi-distance entre avant et arrière
GAUCHE_MOTEUR	le côté gauche, en partie haute du compartiment moteur
DROIT_MOTEUR	le côté droit, en partie haute du compartiment moteur
PNEU_ARR_DROIT	sur l'amortisseur arrière droit, capteur à proximité immédiate du pneu
PNEU_AV_GAUCHE	sur l'amortisseur avant gauche, capteur à proximité immédiate du pneu
BATT_GAUCHE	le côté gauche de l'ensemble batterie.
BATT_DROIT	le côté droit de l'ensemble batterie

La mise de feu a été effectuée à l'aide de pâte à feu sur le siège conducteur.



- Essai n°2 - graphique de résultat des mesures thermiques réalisées sur le 1er véhicule **KANGOO ZE**

Début d'essai à 15 h 15 mn 57 s

- *Séquence 1 (de l'allumage à 4 min)*

La mise de feu étant réalisée sur le siège conducteur, la croissance de la température est enregistrée sur le capteur installé sur l'appui-tête correspondant. La séparation entre la cabine et l'espace arrière de chargement n'étant pas étanche, le thermocouple installé en haut de cet espace réagit avec un décalage d'une minute environ. La combustion est contrôlée par la ventilation qui devient vite insuffisante du fait de l'ouverture partielle des vitres (15 cm environ).

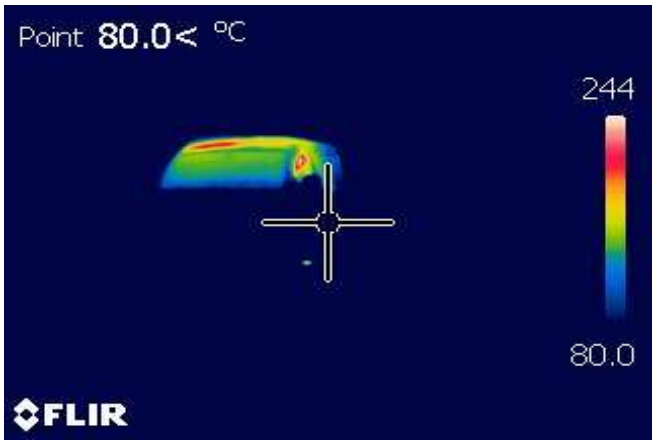
vue thermographique quelques secondes après l'allumage

Observations :

la phase de croissance est interrompue par manque de comburant.

- *Séquence 2 (de 4 min à 6 min)*

Une phase de décroissance du feu est constatée sur les deux points de mesure alors que le capteur situé à mi-hauteur de l'espace de chargement indique une température de 60 °C.

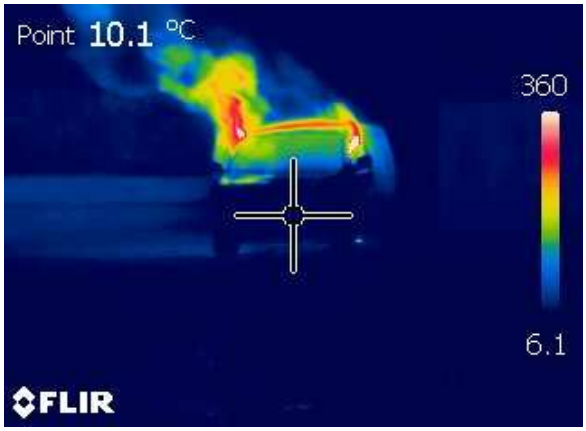


vue thermographique à t_0 + 4 min

- *Séquence 3 (de 6 min à 7 min 30 s)*

L'ouverture de la porte passager amène le comburant nécessaire à une nouvelle croissance rapide du feu. La température dans la cabine va passer de 100 °C à près de 1000 °C en 1 min 30 s. Le régime de feu est désormais contrôlé par le combustible.

La température à mi-hauteur de l'arrière baisse sensiblement.



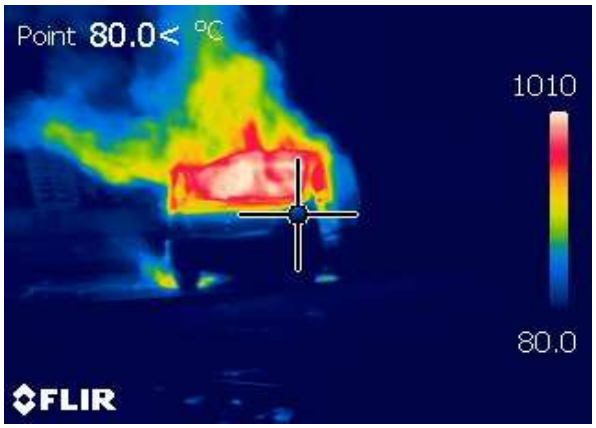
vue thermographique à t_0 + 6 min

Observations :

les flammes sortent au-dessus des sièges et la vitre conducteur cède.

- *Séquence 4 (de 7 min 30 s à 11 min)*

Le feu est stationnaire dans la cabine et la partie haute de l'espace de chargement affectée par les gaz de combustion. Il est vraisemblable que la vitre de séparation entre la cabine et l'arrière du véhicule se brise ou se désolidarise de son jonc de fixation dans cette séquence. Sa dimension n'est toutefois pas significative au regard des surfaces latérales de fuite de la cloison en tôle. La température à mi-hauteur de cet espace s'élève progressivement et approche la température de 300 °C.



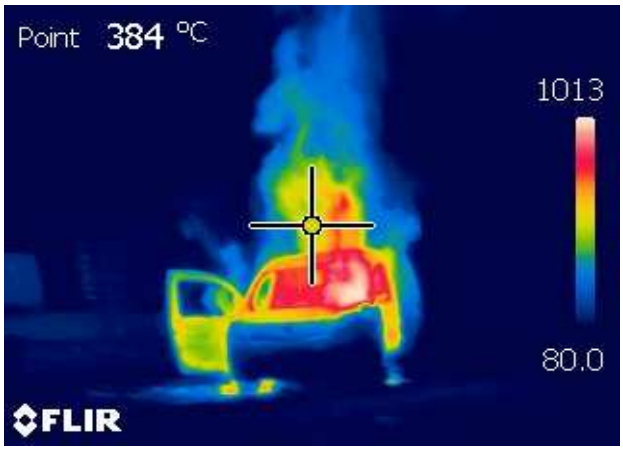
Vue thermographique à t_0 + 9 min

Observations :

l'avertisseur sonore se met en fonctionnement à t_0 + 8 min 52 s et est suivi, quelques secondes plus tard, par les feux clignotants et les phares. Quatre explosions sont entendues à deux minutes d'intervalle.

- *Séquence 5 (de 11 min à 14 min)*

Les flammes atteignent le passage de roue avant gauche, puis le côté gauche du compartiment moteur. Le feu est stable dans la cabine ainsi que les gaz chauds dans l'espace de chargement dont la température en partie basse commence à monter.



Vue thermographique à t_0 + 13 min

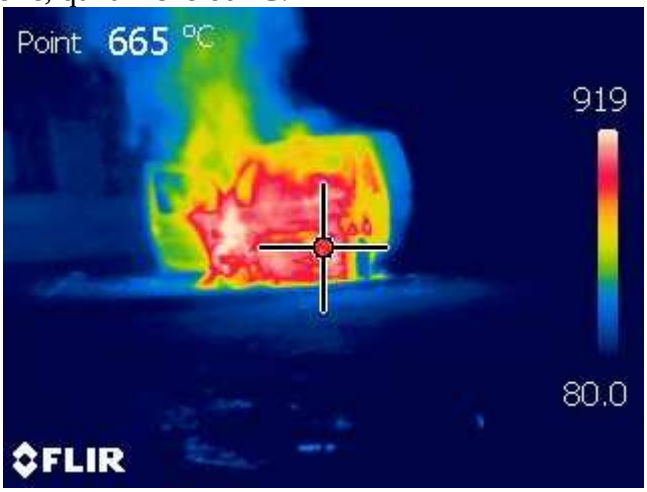
Observations :

nouvelle explosion à t_0 + 12 min 13 située au-dessous du véhicule.

- *Séquence 6 (de 14 min à 18 min)*

Une décroissance des températures est constatée dans la cabine par manque de combustible, accompagnée d'une décroissance des températures des gaz chauds dans l'espace chargement. Le côté droit du compartiment moteur atteint la température de 270 °C alors que le côté gauche du même compartiment et le passage de roue dépassent la température de 700 °C.

Les 4 autres capteurs sont toujours aux températures des conditions ambiantes, à l'exception de celui, situé du côté droit de la batterie, qui affiche 60 °C.



vue thermographique à t_0 + 15 min

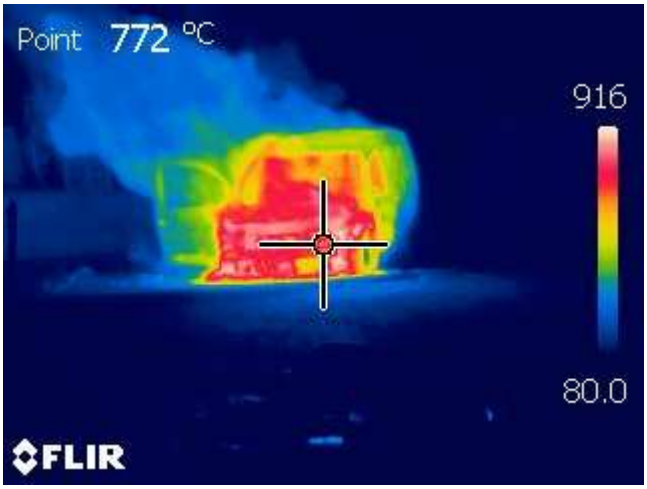
Observations :

explosion à 15 h 30 min 13 s au niveau du compartiment moteur. Le véhicule s'affaisse suite à l'explosion des pneumatiques.

- *Séquence 7 (de 18 min à 20 min 30 s)*

Le manque de comburant dans l'espace arrière de chargement impose d'augmenter la ventilation. La vitre de la porte arrière gauche (plus grande que la droite) est alors brisée par un sapeur pompier.

L'ensemble des températures relevées à l'arrière monte de 300 °C en quelques secondes. L'embrasement du combustible (palettes de bois) permet de dépasser la température de 900 °C. Le compartiment moteur et le pneumatique avant gauche sont toujours embrasés.



vue thermographique à t_0 + 18 min

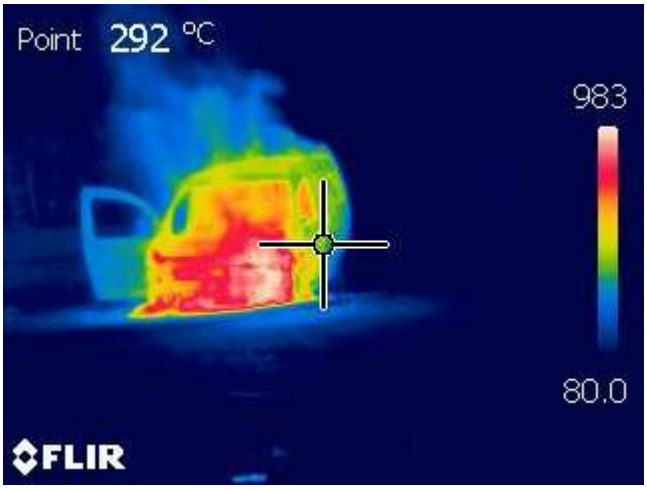
Observations :

explosion à t_0 + 20 min.

- *Séquence 8 (de 20 min 30s à 23 min)*

Les températures autour de la batterie sont désormais fluctuantes autour de la température de 300 °C côté droit alors que le pneumatique arrière droit ne brûle pas, et de la température de 180 °C côté gauche.

La cabine est toujours en phase de décroissance de feu, l'espace chargement est en phase de croissance ainsi que le compartiment moteur.



vue thermographique à t_0 + 22 min

- *Séquence 9 (de 23 min 30s à 26 min)*

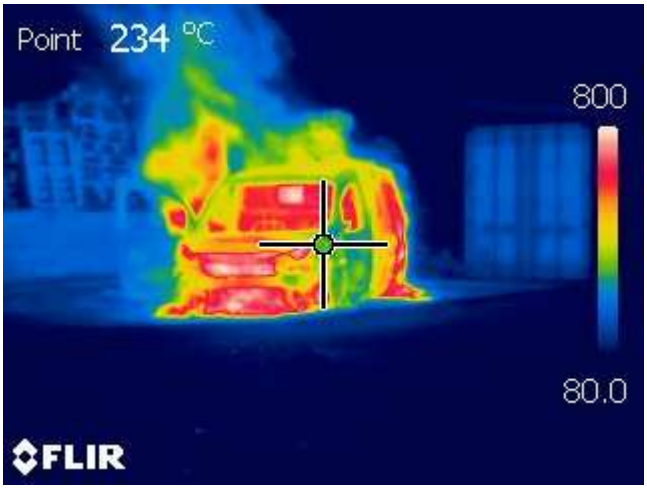
Les phénomènes précédents ont la même cinétique à l'exception d'une baisse de la température du côté gauche de la batterie.

- *Séquence 10 (de 26 min 30 s à 35 min)*

La température de l'espace de chargement est stabilisée et atteint la température de 1000 °C en partie haute. Elle dépasse la température de 850 °C à mi-hauteur et monte, dans cette séquence, en partie basse au niveau du plancher, de 150 °C à 700 °C.

Le pneumatique arrière droit s'enflamme et provoque une élévation de température sur le capteur situé du côté droit de la batterie. Un pic de température de 600 °C est observé à cet endroit.

La cabine est toujours en phase de décroissance de feu ainsi que le pneumatique avant gauche et le côté droit du compartiment moteur. Les températures moyennes autour de batterie sont de l'ordre de 260 °C.



vue thermographique à t_0 + 35 min

Observations :

explosion à t_0 + 27 min. Les pneumatiques arrière brûlent.

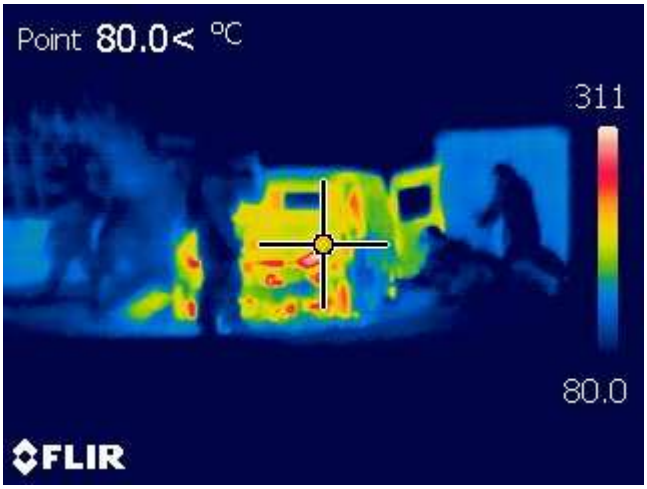
- *Séquence 11 (de 35 min à 38 min)*

Tous les éléments en combustion sont en phase décroissante à l'exception du pneumatique arrière droit et de l'espace de chargement. Les températures dans la zone de la batterie fluctuent autour d'une température de 250 °C.

vue thermographique à t_0 + 37 min

- *Séquence 12 (de 35 min à 46 min -fin des mesures)*

Procédure d'extinction. Les températures chutent brutalement. Les températures du « plug » de la batterie permettent de constater que l'emballement thermique de la batterie n'a pas été atteint. Le soulèvement du véhicule à l'aide d'une grue confirme cet état.



Vue thermographique à t_0 + 44 min

Observations :

le coffrage de protection de la batterie est intact. Un percement de ce coffrage à l'aide d'un pieu métallique permet de constater que les deux modules du pack batterie sont en bon état.

Essai n°3 véhicule KANGOO ZE.

Il s'agit d'un véhicule neuf totalisant quelques kilomètres. La fiche technique du véhicule n'a pas été fournie. L'ensemble batterie est situé à l'arrière du véhicule, sous le coffre de chargement qui était rempli de palettes de bois.

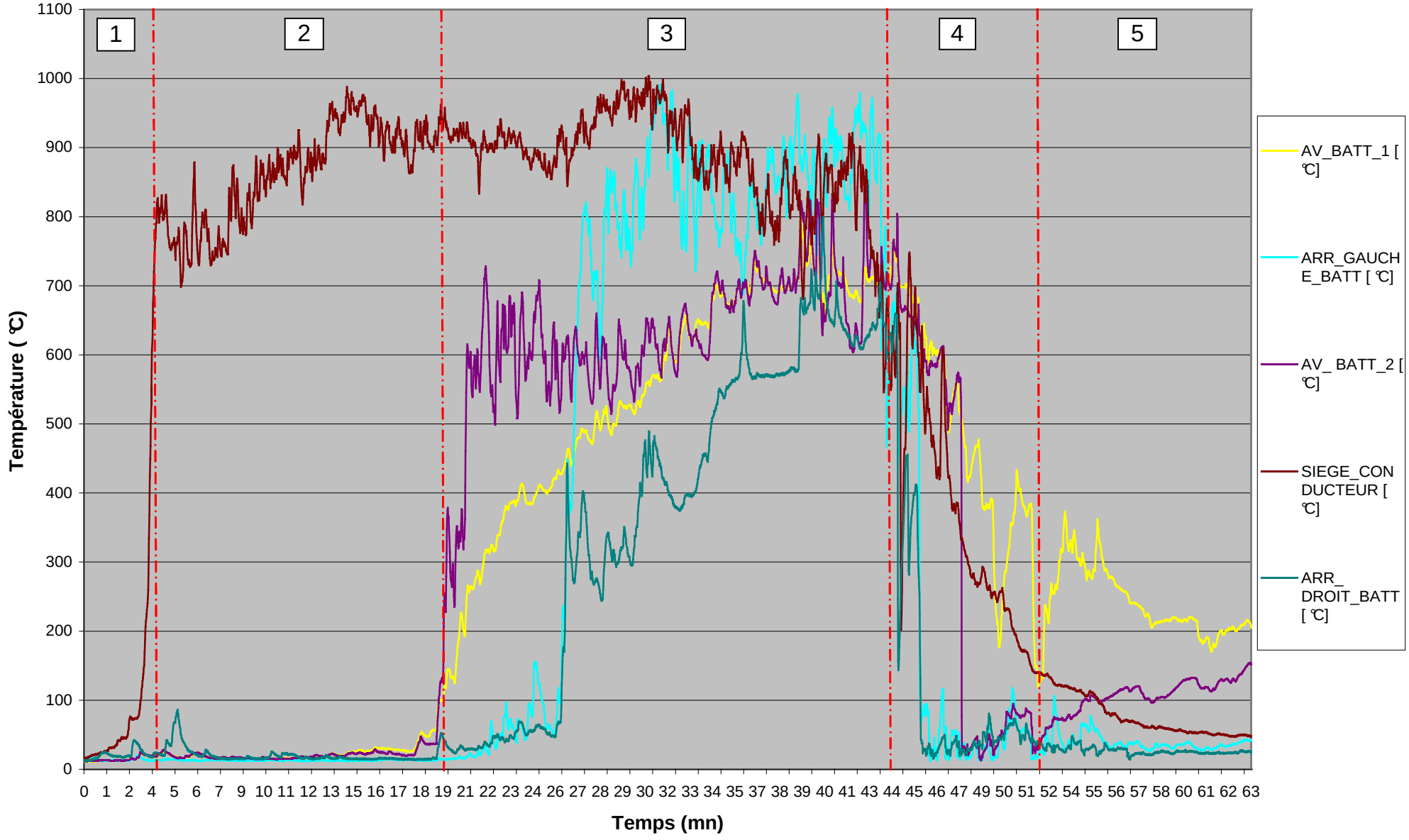
Les ensembles de batteries des deux précédents véhicules n'ayant pas atteint les conditions d'emballement thermique, il a été décidé de provoquer cet emballement en disposant du combustible sous le véhicule (2 épaisseurs de palettes de bois).

Compte tenu du retard pris sur les essais, il a été demandé au LCPP de réduire le nombre de capteurs à installer. Ainsi l'environnement du bac de la batterie a été privilégié.

Position des thermocouples

Nom du capteur dans le fichier de résultat	Fixation du capteur sur:
AV_BATT_1	l'ensemble batterie, dans l'espace de séparation entre l'avant de celle-ci et le dessous de la tôle du coffre de chargement
ARR_GAUCHE_BATT	le longeron situé à l'arrière de l'ensemble batterie, en face de la soupape de gauche.
AV_BATT_2	l'ensemble batterie, dans l'espace de séparation entre l'avant de celle-ci et le dessous de la tôle du coffre de chargement (idem TH1)
SIEGE_CONDUCTEUR	sur l'appui-tête sur siège conducteur
ARR_ DROIT_BATTERIE	le longeron situé à l'arrière de l'ensemble batterie, en face de la soupape de droite.

La mise de feu à l'aide de pâte à feu a été effectuée sur le siège conducteur, dans le coffre sur les palettes chargées, et sur les palettes disposées sous le véhicule. Un brûleur portatif à gaz a également été mis en œuvre pendant l'essai pour accélérer la combustion des palettes au sol.



- Essai n°3 - graphique de résultat des mesures thermiques réalisées dans le 1er véhicule **KANGOO ZE**

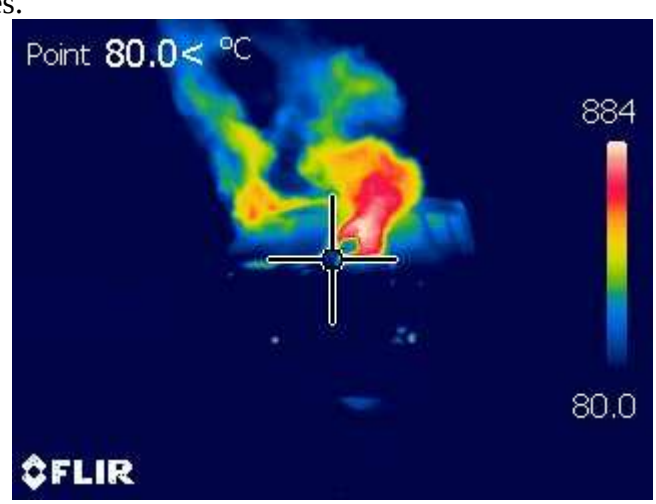
Cet essai était destiné à provoquer l'emballement thermique de la batterie. A cet effet, du combustible a été ajouté sous le véhicule sous la forme de deux épaisseurs de palettes de bois. Par ailleurs, pour favoriser le développement rapide du feu, les vitres de la cabine étaient baissées, la vitre de séparation entre la cabine et l'espace de chargement a été brisée, et la porte latérale de chargement était ouverte. La pâte à feu a été utilisée dans l'habitacle sur le siège passager, dans l'espace de chargement et en plusieurs points sur les palettes posées au sol. Un brûleur à gaz a également favorisé l'embrasement des palettes au sol.

Le retard accumulé sur les précédents essais a conduit à limiter le nombre des points de mesure, et de les concentrer autour de la batterie. Un thermocouple a toutefois été installé dans l'habitacle, au niveau de l'appui-tête du conducteur.

Début d'essai à 17 h 00 mn 28 s

- *Séquence 1 (de allumage à 4 min)*

La croissance de la température dans l'habitacle est rapide et celle-ci dépasse une température de 800 °C au bout de 4 minutes.



vue thermographique à t_{0+2} min 30 s

- *Séquence 2 (de 4 min à 19 min)*

Le feu dans l'habitacle est stabilisé, et la température approche une température de 1 000 °C. Les effets thermiques de l'inflammation des palettes du sol ne sont pas significatifs et les capteurs situés autour de la batterie demeurent à très faible température (environ 30 °C).

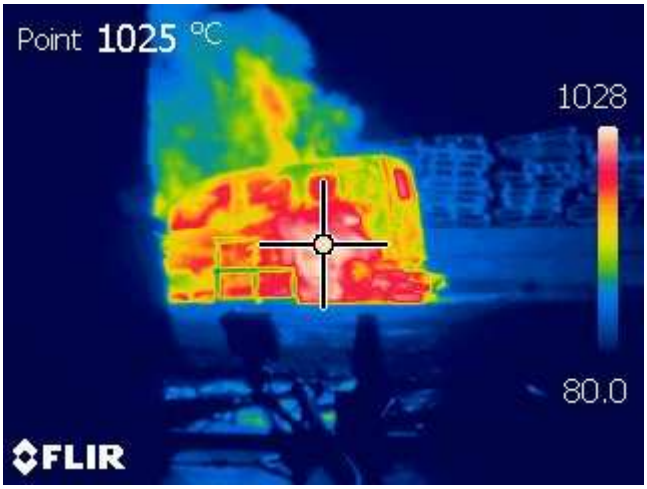
vue thermographique à t_0 + 16 min 30 s

Observations :

déclenchement de l'avertisseur sonore vers t_0 + 4 min, suivi d'une explosion. Fonctionnement des feux clignotants vers t_0 + 5 min, suivi de six explosions en quatre minutes. Les pneumatiques avant sont en feu après 10 minutes d'essai. Deux autres explosions sont entendues entre t_0 + 14 min et t_0 + 17 min.

- *Séquence 3 (de 19 min à 42 min)*

La combustion de l'habitacle est contrôlée par le combustible. L'embrasement des palettes de bois installées sous le véhicule combiné au feu de l'espace de chargement conduit à une élévation rapide des températures mesurées à l'avant de la batterie, puis, 5 minutes plus tard, à l'arrière de celle-ci. Ces températures sont représentatives de l'environnement de la batterie (entre 500 °C et 800 °C), mais sont surtout liées aux flammes qui proviennent des palettes de bois.



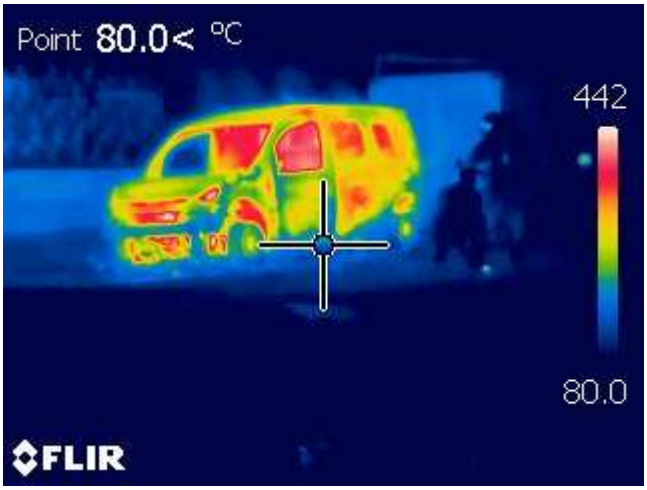
vue thermographique à t_0 + 28 min

Observations :

les pneumatiques arrières brûlent et trois explosions se succèdent entre t_0 + 21 et t_0 + 22 minutes. Des crépitements sont perceptibles depuis le dessous du véhicule. Les flammes changent de couleur pour passer du rouge orangé au bleu/vert. Les gaz de combustion deviennent plus irritants pour les opérateurs situés au PC Mesure.

- *Séquence 4 (de 42 min à 52 min)*

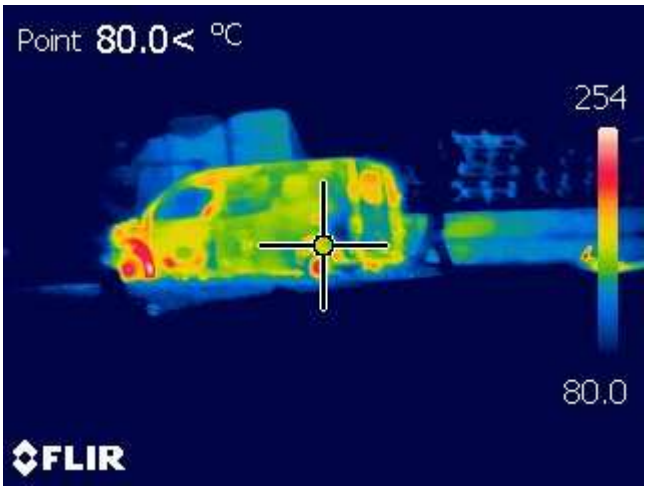
Procédure d'extinction - Les températures de l'habitacle et des points de mesures de l'environnement de la batterie chutent rapidement sous l'action de l'eau. En particulier, les thermocouples situés à l'arrière de la batterie, plus facilement accessibles par la lance d'incendie indiquent une température d'environ 50 °C. Les capteurs à l'avant de la batterie, mieux protégés de l'action de l'eau, affichent des températures qui dépassent les 400 °C. Les « coups » de lance à incendie sont visibles sur le capteur AV_BATT_1 et permettent de valider l'état d'emballement thermique de la batterie. La visualisation de flammes de couleur bleue/verte confirme la combustion des éléments internes de la batterie.



vue thermographique à 17 h 47 min

- *Séquence 5 (de 52 min à 63 min - fin des enregistrements)*

L'extinction des flammes reste difficile jusqu'à la destruction de l'enveloppe métallique de l'ensemble batterie. Le carter de protection étant très endommagé et partiellement fondu, l'action combinée du refroidissement par l'eau et la disparition des organes internes permettent d'obtenir l'extinction des flammes.



vue thermographique à 17 h 55 min

Essai n°4 véhicule TWIZY

Ce véhicule était dépourvu de ses portes, des passages de roues et de divers accessoires. Compte tenu de l'heure tardive, les conditions nocturnes n'ont pas permis d'installer des capteurs sur ce véhicule. Celui-ci a été chargé également en palettes de bois et en cartons pour provoquer l'emballement thermique de la batterie. Les illustrations sont données à titre indicatif.

vue de ¾ arrière (*image du site internet Renault*)	vue de côté (*image LCPP*)

8.2 Mesures électriques

Avant de discuter du risque de choc électrique, et des mesures qui peuvent être prises au moment de l'intervention sur ces véhicules, il faut s'attarder quelques instants sur la technologie employée et sur les circonstances qui peuvent aboutir à tels accidents.

Les véhicules à motorisation électrique ou hybride possèdent une source d'énergie embarquée (EEE) dont la tension est du domaine de la Basse Tension (BT) ou du domaine de la Très Basse Tension (TBT) dont les valeurs limites sont rappelées dans le tableau suivant :

domaine de tension	**Valeur de la tension nominale U_n exprimée en volts**	
	en courant alternatif	**en courant continu**
Très Basse Tension (domaine TBT)	$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (domaine BT)	$50 < U_n \leq 1\,000$	$120 < U_n \leq 1\,500$

Les batteries d'accumulateurs sont constituées de multiples cellules d'énergie mises en série pour permettre d'obtenir des tensions élevées ici de l'ordre de 400 volts en courant continu, ou en parallèle pour augmenter l'intensité. La tension et la puissance de chaque cellule sont fonction du couple oxydoréducteur mis en œuvre. La tension d'un élément et sa puissance électrique respective sont données dans le tableau suivant [source Wikipedia]

Type	Énergie massique en Wh/kg	Énergie volumique en Wh/l	Tension d'un élément	Puissance en pointe (massique) en W/kg
Li-ion	90-180	220 - 440	3,6 V	1500
Li-Po(ion polymère)	100 -130	?	3,7 V	250
Li-PO4 (lithium phosphate)	120 -140	190 - 220	3,2 V	800
LMP (lithium metal polymer)	110	110	2,6 V	320
Li-Air	1500-2500	?	3,4 V	200
Ni-Li	935	?	3,49 V	?

L'ensemble de ces cellules qui constitue la batterie récupère l'énergie électrique sur un bus qui possède un pôle positif noté ⊕ et un pôle négatif noté ⊖. La différence de potentiel entre ces deux bornes peut être de plusieurs centaines de volts en continu en fonction du nombre de cellules mises en série, pour les batteries de Renault la tension est de l'ordre de 400 volts.

Par conception, un véhicule peut-être alimenté par des batteries à potentiel fixé ou à potentiel flottant. En potentiel fixé, la carrosserie est connectée soit à une des deux bornes, soit à un potentiel de référence. En potentiel flottant, les bornes sont isolées de la carcasse métallique.

Un véhicule à propulsion électrique présente les mêmes risques de chocs électriques pour le corps humain que n'importe quel équipement électrique standard, à ceci près que l'on est à l'extérieur et que l'enveloppe du véhicule, presque toujours métallique, est isolée du sol (terre) par ses pneumatiques fabriqués par des matériaux en caoutchouc .

En terme de risques électriques, il faut considérer deux cas :

- le moment de la charge, véhicule raccordé au réseau de distribution publique en régime alternatif à une tension 230V ou 400 V suivant un branchement monophasé ou triphasé. Il est connecté par intermédiaire d'un câble de raccordement amovible formé des conducteurs actifs et du conducteur de protection,

- en traction ou en stationnement, véhicule alimenté sur sa seule source d'énergie embarquée propre à savoir sa batterie qui peut délivrer une tension de 400V en régime continu.

En charge, il y a lieu de prendre en compte les risques liés à la présence simultanée des deux tensions alternative et continue.

Il faut rappeler qu'au moment du choc électrique, le corps humain réagit au passage du courant (acte réflexe, tétanisation des muscles, fibrillation du muscle cardiaque) aussi bien en régime alternatif qu'en régime continu. Ce passage de courant ne peut se produire que lorsque le corps se trouve inséré dans un circuit. Dans ce cas, il faut nécessairement deux points de contact, soit directement sur des conducteurs actifs soit indirectement sur des pièces métalliques elles-mêmes mises sous tension accidentellement.

En extérieur, on doit considérer que l'un des deux points de contact est presque toujours réalisé par le sol, si aucune précaution d'isolement supplémentaire n'est prise.

Il n'est besoin de faire passer dans le corps que quelques dizaines de milliampères (50 mA) en courant alternatif, et quelques centaines de milliampères en courant continu pour produire des dégâts importants, et irréversibles.

Par ailleurs, le corps humain étant bien moins sensible à une tension continue, les conséquences sont que le passage du courant continu est susceptible de produire des dégâts plus graves notamment par brûlures importantes avant que la personne en contact ne se rende compte de son passage.

- *Véhicule en charge, connecté au réseau de distribution publique*

Le premier cas à analyser est celui du véhicule branché à une borne alimentée par le réseau de distribution publique en monophasé 230 V. En triphasé 400 V, le problème est identique, mais avec une tension plus importante.

Le véhicule est relié par un câble souple entre une borne de distribution publique et un connecteur fixé sur le véhicule. L'installation électrique conforme aux dispositions de la norme NFC - 15100, doit être protégée par des protections magnétiques, thermiques et différentielles contre les surintensités, les courts-circuits et les défauts à la terre, comme tout équipement électrique banal.

Cependant, la seule connexion de l'enveloppe métallique du véhicule au réseau général de protection (terre) de l'installation, compte tenu de son isolement lié aux bandages en caoutchouc des roues, ne se fait que par le conducteur de protection du câble d'alimentation.

En cas de défaut à la terre sur ce circuit d'alimentation dans le véhicule par mise en contact accidentel du conducteur de phase avec la carcasse métallique, un courant de défaut plus ou moins important s'écoulera par ce conducteur. Cela aura pour conséquence immédiate d'interrompre automatiquement l'alimentation électrique au niveau de la borne, et ceci par déclenchement du dispositif différentiel à courant résiduel (interrupteur différentiel) sur le tableau de distribution. Ce dispositif est calibré pour protéger le corps d'une mise en contact avec une tension dont la valeur ne doit pas dépasser 50 V, 24 V ou 12 V en fonction des conditions d'influences externes (présence d'eau ou non).

Ce dispositif de protection s'avère en pratique rapide et très efficace à condition qu'il soit calibré à une sensibilité suffisante (15 ou 30 mA) et que la continuité du conducteur de terre bien soit bien assurée.

Il est important de retenir qu'en cas de rupture de ce dernier (conducteur de protection), le dispositif devient incapable de fonctionner, et la carcasse métallique, à ce moment-là, peut être portée jusqu'à la valeur de tension de phase de 230 V. Il suffira d'un seul point de contact sur le véhicule pour qu'un individu subisse un choc électrique. Sa gravité dépendra du courant qui va transiter dans son corps qui est fonction de sa résistance interne et de son niveau d'isolement électrique par rapport à la terre.

Il peut parfaitement être imaginé que cette situation puisse se produire au moment d'un incendie débutant à proximité des circuits d'alimentation ou du connecteur de la prise du véhicule avec destruction du câble de protection (terre) et mise sous tension de la carcasse métallique de la voiture. Cette hypothèse doit être prise en compte.

En tout état de cause, ce risque pourrait être systématiquement évité par l'isolement du véhicule du réseau de la distribution publique par débranchement physique du connecteur ou du câble de raccordement.

- *Véhicule non en charge, alimenté sur la batterie (EEE) :*

Dans le second état, le véhicule n'est pas connecté à une borne d'alimentation. Le risque électrique est essentiellement lié à la présence de la batterie. Pour subir un choc électrique, il faut absolument que l'individu soit connecté simultanément aux deux pôles de la batterie soit par contact direct sur le bus d'alimentation soit par l'intermédiaire de pièces métalliques accidentellement mises sous tension. De plus, il faut tenir compte que le véhicule reste isolé du sol par les bandages en caoutchouc des roues.

Par ailleurs, en cas de destruction de ces pneumatiques, le véhicule n'est plus isolé du sol, et on peut considérer l'éventualité d'un retour d'une des polarités par la terre au travers de la carcasse métallique; un seul point de contact est, dans ce cas, suffisant pour provoquer un choc.

Les informations fournies par les constructeurs indiquent qu'en cas de contact entre les deux polarités de la batterie, les cellules se mettent en court-circuit et l'alimentation se coupe.

Pour avoir un risque de choc électrique à savoir qu'un individu puisse être en contact avec soit la borne positive ⊕ soit la borne négative ⊖, il faut donc impérativement qu'aucun contact entre ces deux bornes ne puisse se faire.

Toutefois, l'éventualité que les deux bornes ne puissent jamais entrer en contact est très faible durant un incendie. En effet, la chaleur aura pour effet de détruire les isolants en matériau plastique des câbles électriques et de produire irrémédiablement un contact entre eux ; ce court-circuit déclenchant l'arrêt de l'alimentation délivrée par la batterie. Cette probabilité est d'autant plus faible que l'incendie est important. Si le risque électrique était à retenir, il serait plutôt dans les premiers instants de l'incendie. Toutefois, à ce moment-là, le fait de toucher les deux bornes en même temps par un intervenant est rendu difficile par les aménagements intérieurs qui l'en empêchent.

Si le risque de choc électrique dans un incendie est peu probable, en cas d'accident de la route, la rupture mécanique du bus avec mise sous tension de pièce métallique n'est pas à exclure. D'ailleurs, il est pris en compte dans le « *recueil d'instruction de sécurité d'ordre électrique pour opérations sur véhicules/engins automobiles à motorisation électrique et énergie électrique embarqué, en basse tension* » publié par Union Technique d'Électricité (UTE) en octobre 2011 (UTE C 18-550) qui prescrit au chapitre 11 paragraphe 11.2.3.1 la conduite à tenir en cas d'accident et notamment lors du dégagement de l'accidenté en utilisant des moyens d'isolement supplémentaires pour l'intervenant (gants, tapis, etc.) lorsque la mise hors tension n'est pas possible.

De plus, la rupture de ce bus peut être également envisagée lors de la dislocation de la carcasse métallique par des pinces hydrauliques pendant une désincarcération. Et là, les probabilités de toucher un des conducteurs en ayant porté l'autre à la masse métallique ne sont pas à exclure.

Il y avait lieu, dans le cadre de l'adaptation de procédures d'intervention par les services de secours, de procéder à des mesures sur des nouveaux moyens matériels. Le système utilisé était en l'occurrence un « burin » qui permet de percer le carter de fixation du pack batterie afin de pouvoir y injecter de l'eau au niveau du pack batterie pour le refroidir. Les essais doivent permettre de vérifier la fonctionnalité de ce burin et la sécurité de l'intervenant du point de vue des chocs électriques liés aux tensions de la batterie de traction (400 V).

Le burin est en acier et la sécurité électrique est assurée par l'utilisation d'un manche en matière synthétique isolante. Cependant, la pointe permettant le perçage peut être en contact avec des éléments sous tension au moment du percement de la coque. Le burin a été muni d'un conducteur de mesure au niveau de cette pointe. Il d'ailleurs probable comme indiqué ci-dessus que ceci facilite la mise hors tension de la batterie en provoquant un court-circuit interne les cellules.

Compte tenu de la demande de RENAULT de réaliser les essais dans les conditions les plus proches de la réalité, il n'a pas été possible de précâbler le véhicule pour les mesures avant les essais, car les pôles ⊕ et ⊖ n'étaient pas accessibles. Cela aurait permis de mesurer la chute effective de la tension de sortie de la batterie au moment du percement.

Le burin a été utilisé après avoir éteint le feu de véhicule. Les mesures de tension ont été faites pendant le percement du carter du pack batterie. Les tensions ont été mesurées entre la pointe du burin et la masse du véhicule.

Essai n°1 : pas d'utilisation du pieu du fait de la préservation de la batterie après le feu

Essai n°2 : utilisation du burin pour percer le carter de fixation de protection du pack batterie. 0V mesuré. Les modules n'ont pas été atteints par le burin. Arrêt de la mesure.

Essai n°3 : le carter de fixation du pack batterie étant détruit, le burin n'était plus nécessaire pour atteindre les modules. Pas de mesure.

Essai n°4 : utilisation du burin pour percer le carter de fixation du pack batterie. 15V mesuré. Des courts-circuits ont été provoqués par le pieu générant ainsi des étincelles au niveau des modules et la projection d'éléments incandescents. Plusieurs orifices ont ainsi été créés permettant l'introduction d'eau à l'intérieur du pack batterie.

Les mesures qui ont été effectuées n'ont pas permis de mesurer le niveau de tension de la sortie de la batterie. On peut simplement indiquer que le pieu comme il avait été indiqué a produit un court-circuit

local et s'est retrouvé à une tension qui indique que seules quelques cellules ont été impactées par l'introduction de ce pieu.

8.3 Essais concernant les prélèvements d'eaux et les frottis :

8.3.1 Prélèvements et stabilisations

Les modalités de prélèvements, de stabilisation et de conservation des échantillons ont été établies sur la base des informations données dans les documents ci-dessous :

- Méthode interne EAU_PSQ0447 (révision 02) : Réalisation d'une enquête – Eaux et Sols.
- Norme NF EN ISO 5667-1 : Qualité de l'eau – Lignes directrices pour la conception des programmes et des techniques d'échantillonnage.
- Norme FDT 90-523 : Qualité de l'eau – Guide de prélèvement pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement – Partie 2 : prélèvement d'eau résiduaire.
- Norme NF EN ISO 5667-3 : Qualité de l'eau – Lignes directrices pour la conservation et la manipulation des échantillons d'eau.

Prélèvements des blancs

Deux prélèvements de « blancs » ont été réalisés par les équipes du LCPP : le « blanc eau » d'extinction et le « blanc terrain ».

Le « blanc terrain » a été réalisé au début de la série d'incendie de véhicules.

Entre chaque incendie le sol et le regard ont été rincés pour éviter la contamination des prélèvements suivants.

La faible quantité de résidus résultant de l'incendie d'un véhicule « n » n'a pas pu impacter les résultats du véhicule « n+1 ».

Prélèvements des eaux d'extinction

Trois prélèvements d'eaux ont été effectués.

Ces prélèvements d'eaux ont été réalisés par les sapeurs-pompiers immédiatement après extinction des véhicules.

Pour chaque essai, un volume total d'environ 750 ml d'eau a été prélevé au moyen de flacons en matière plastique à usage unique.

Les échantillons, une fois refroidis à température ambiante, ont été fractionnés et stabilisés, en fonction des paramètres recherchés, en application de la norme NF EN ISO 5667-3 (06/2004) ou des normes analytiques spécifiques.

Tous les autres flacons contenant les différentes fractions ont été transportés dans une enceinte réfrigérée et conservés par réfrigération jusqu'à l'analyse.

Prélèvement d'eau dans l'enceinte du bloc batteries :

Les blocs batteries de deux véhicules n°1 ZOE et n°3 KANGOO ont été affectés par l'incendie, cependant aucun prélèvement d'eau n'a pu être réalisé, soit parce manque d'accessibilité, soit parce qu'aucune présence d'eau n'a été constatée.

Prélèvement par frottis

Un seul prélèvement par frottis a été réalisé, au sein du bloc batteries du véhicule n°1 ZOE, à proximité de l'orifice, environ 1h après l'extinction. Des traces de carbonisation sont visibles sur la partie accessible, mais la détérioration occasionnée semble limitée.

Aucun frottis n'a pu être réalisé sur le véhicule n°3 KANGOO ZE, les batteries sont totalement détruites, mais aucune trace d'eau n'était présente et l'orifice existant ne présentait pas un diamètre suffisant pour permettre un accès à l'intérieur de l'enceinte.

Aucun frottis n'a été réalisé pour le véhicule n°2 KANGOO ZE, ses batteries ayant été retrouvées intactes.

8.3.2 Identification et description des prélèvements

Une étiquette d'identification a été apposée sur chaque récipient contenant les différents prélèvements.

Référence échantillon	Lieu de prélèvement	Heure de départ du feu	Heure de prélèvement
01/EC7853 « Blanc eau »	Sortie de lance à incendie	-	11 h 45
01/EC7854 « Blanc terrain»	Regard de l'aire d'essai	-	12 h 00
01/EC7855 Frottis Véhicule n°1 (ZOE)	Bloc batterie	13 h 25	15 h 00
01/EC7856 Eau Véhicule n°1 (ZOE)	Regard de l'aire d'essai	13 h 25	14 h 05
01/EC7857 Eau Véhicule n°2 (KANGOO ZE)	Regard de l'aire d'essai	15 h 15	16 h 00
01/EC7858 Eau Véhicule n°3 (KANGOO ZE)	Regard de l'aire d'essai	17 h 00	18 h 05

8.3.3 Mesures sur site et analyses en laboratoire

8.3.3.1 Mesures sur site

Mesures de pH :

Des mesures de pH ont été effectuées sur les 3 échantillons d'eaux d'extinction ainsi que sur les prélèvements témoins.

La nature des eaux prélevées n'a pas permis l'utilisation du pH-mètre. Compte tenu de l'aspect et de la nature des prélèvements un risque d'endommagement du matériel ne pouvant être exclu, les mesures de pH ont été réalisées à l'aide de bandelettes.

Mesures de température de l'eau prélevée

La sonde de température prévue pour les essais étant couplée au pH-mètre, aucune mesure de température d'eau n'a été effectuée.

8.3.3.2 Analyses en laboratoire

Les méthodes d'analyses utilisées et les résultats obtenus sont détaillés en annexe n°1.

8.3.4 Avis et interprétations

Méthodologie

Les résultats obtenus pour les différents prélèvements sont comparés avec ceux obtenus pour les « blancs » afin d'identifier les polluants générés par les véhicules testés.

Les batteries du véhicule n° 2 KANGOO ZE n'ayant pas été endommagées par l'incendie, les résultats obtenus pour ce véhicule serviront de point de comparaison pour les deux autres véhicules.

Les installations rejetant des eaux résiduaires disposent de manière générale d'un arrêté d'autorisation de rejet qui leur est propre et qui tient compte de leur activité. En l'absence d'arrêté, un des documents de référence utilisable est l'arrêté du 2 février 1998. Ce dernier est relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation – version consolidée au 14 novembre 2011.

Ce document sera cité en référence lors de l'étude de l'impact sur l'environnement.

Difficultés rencontrées

La comparaison des résultats obtenus est rendue difficile du fait de l'absence de données sur les quantités d'eau mises en œuvre pour éteindre chaque véhicule. Ces quantités ont une influence directe sur les concentrations des composés recherchés. Seules des durées d'intervention peuvent permettre d'avoir un point de comparaison.

Ainsi, le volume d'eau utilisé pour le véhicule n°3 KANGOO ZE semble nettement plus important que pour les deux autres feux de véhicules. La période d'intervention des sapeurs-pompiers ayant été d'environ 20 minutes pour ce véhicule contre 10 minutes pour les deux autres.

En conséquence, si on effectue une comparaison entre les trois véhicules, les résultats obtenus pour le véhicule n°3 KANGOO ZE sont probablement sous-estimés, car aucun prélèvement n'a pu être réalisé au bout de 10 minutes. L'eau étant évacuée au fur et à mesure, les prélèvements effectués dans le regard correspondent aux derniers polluants récupérés dans la phase finale de l'opération juste avant extinction du véhicule et ne reflètent pas la totalité des composés émis au cours de l'incendie.

Concernant les recherches des composés organiques volatils dans les eaux récupérées, leur interprétation est rendue difficile du fait de l'absence de données concernant la température de l'eau lors de sa récupération. Une température élevée peut expliquer une évaporation partielle ou totale des composés organiques recherchés. Les durées des incendies et les températures atteintes par le feu affectent directement les concentrations de ces composés dans l'eau, modifiant leur répartition entre l'eau et l'air en fonction de leur propre volatilité.

Interprétation des résultats

a) Mesures de pH

Le pH des eaux d'extinction est proche de celui de l'eau provenant de la lance d'incendie, pour deux des véhicules : le véhicule n°1 ZOE et le véhicule n°3 KANGOO ZE (Annexe 1A).

Les valeurs mesurées sont comprises dans les limites autorisées de 6,5 à 8,5 fixées dans l'arrêté du 2 février 1998 (Annexe 2).

Pour le **véhicule n°2 KANGOO ZE**, le pH mesuré est de 11, c'est un **pH basique** qui est largement supérieur aux limites autorisées (Annexe 2).

Ces mesures de pH restent toutefois indicatives, la mesure ayant été réalisée à l'aide de bandelettes. Des mesures plus précises avec un matériel adapté à ce type d'échantillon permettraient d'avoir des résultats plus fiables.

b) Comparaison avec les blancs

Les résultats des analyses du « frottis » réalisé sur le véhicule n° 1 ZOE au voisinage de l'emplacement des batteries montrent, pour la plupart des polluants recherchés, des valeurs proches de celles obtenues pour les blancs (annexe 2).

Concernant les eaux d'extinction, par comparaison avec les blancs, il ressort de cela que celles-ci se sont chargées en :

- anions : fluorure, chlorure, sulfate, thiosulfate (annexe 1A)
- cations : sodium, potassium, ammonium, calcium (annexe 1A)
- éléments métalliques : aluminium, baryum, cobalt, cuivre, fer, lithium, manganèse, nickel et zinc (annexe 1C)
- composés organiques : benzène, toluène, méthanol et éthanol (annexe 1B).

La présence massive de calcium pourrait s'expliquer par la formation de cendres au cours de l'incendie. De même, les composés benzéniques (benzène, toluène) sont des produits de dégradation retrouvés fréquemment dans les résidus après un incendie.

Les concentrations significativement élevées en fer, aluminium et nickel s'expliquent en partie par la constitution même des véhicules.

Par exemple, l'acier qui peut entrer dans la fabrication des véhicules est composé majoritairement de fer et de carbone auxquels sont ajoutés des éléments d'addition tels que le manganèse, et le nickel. Pour lutter contre la corrosion, il est souvent galvanisé et donc recouvert de zinc.

La combustion d'un véhicule en acier galvanisé produira entre autres des oxydes de fer et de zinc. Ces informations pourraient expliquer la présence de ces éléments métalliques dans les eaux d'extinction.

La présence d'ions chlorures peut s'expliquer par la présence éventuelle de PVC dans l'habitacle des véhicules.

Lors de la combustion des revêtements en PVC, il se produit notamment un dégagement d'acide chlorhydrique (HCl). Cet acide dilué dans l'eau se retrouve sous forme de chlorures. Cet anion a été retrouvé massivement dans les eaux d'extinction.

c) Comparaison entre les 2 véhicules KANGOO ZE

Une différence significative a été observée entre les deux véhicules (annexes1A et 1C).

Le lithium, le manganèse, le cobalt, le nickel et les fluorures ont été retrouvés massivement dans les eaux d'extinction du véhicule n°3 KANGOO ZE et en moindre concentration dans les prélèvements réalisés sur le véhicule n°2 KANGOO ZE.

Les véhicules étant supposés identiques, on peut émettre ***l'hypothèse n°1*** que la **destruction totale de la batterie** du véhicule n°3 KANGOO ZE est à l'**origine** de cette différence, la batterie du véhicule n°2 KANGOO ZE ayant été retrouvée intacte. Hypothèse en partie confortée par la composition possible des batteries lithium-ion (**fluorures, lithium, nickel, cobalt et manganèse**).

Pour les **ions chlorure, sulfate, sodium, calcium, strontium et zinc**, on obtient cette fois des concentrations supérieures pour le véhicule n°2 KANGOO ZE par rapport à celles obtenues pour le véhicule n° 3 KANGOO ZE. Le prélèvement pour le véhicule n°3 intervenant au bout de seulement 20 minutes, ces composés sont retrouvés en concentration moindre du fait d'une dilution due aux arrosages successifs. On peut émettre *l'**hypothèse** **n°2*** que ces **composés ne sont pas spécifiques des batteries** et qu'ils sont émis soit au début soit tout au long de l'incendie.

d) Comparaison entre le véhicule n°1 ZOE et le véhicule n°2 KANGOO ZE

Pour ces deux véhicules, la durée d'extinction du feu est à peu près équivalente, les effets sur les batteries semblent les plus proches avec des dégâts limités, voire absents.

Les résultats obtenus pour les **ions chlorure, sulfate, sodium, ammonium, calcium et strontium** pour les deux véhicules sont comparables pour des volumes d'eau utilisés que l'on peut estimer assez proches et ne sont pas spécifiques de la batterie ce qui conforte l'*hypothèse n°2*.

8.4 Analyses des gaz prélevés près des intervenants

Ce point concerne l'évaluation de l'exposition au COV (notamment benzène) et à l'acide fluorhydrique des intervenants pompiers lors de l'extinction d'un véhicule électrique (prélèvement individuel). De plus, des mesures ont été réalisées à poste fixe dans l'air ambiant à 15 mètres du véhicule en feu.

8.4.1 Description des lieux et des points de prélèvements

Il a été décidé de réaliser deux mesures d'exposition sur les deux sapeurs-pompiers (M.CEKANOWSKI et M. POUVALOUR) intervenants lors de chaque essai, et une mesure dans l'air ambiant pendant la phase d'extinction (sauf essai 3, pendant la phase d'incendie et d'extinction). Les périodes de mesure sont résumées dans le tableau n° 1.

Les deux pompiers portent leur appareil respiratoire isolant (ARI). La mesure d'exposition est réalisée dans la zone respiratoire des intervenants hors de l'ARI qui est un équipement de protection individuelle (EPI). (photo page 8).

L'exposition est mesurée à proximité des voies respiratoires des intervenants.

Points de mesure		**Méthodes de mesure**	**Périodes de mesure le 20 janvier 2012**
Prélèvement individuel Opérateur : M.CEKANOWSKI	Air des lieux de travail	Prélèvement actif Support adsorbant : charbon actif	Essai 1: de 13 h 53 à 14 h 13
			Essai 2: de 15 h 51 à 16 h 09
			Essai 3: de 17 h 43 à 18 h 16
		Prélèvement actif Support adsorbant : Filtre fibre de quartz	Essai 1: de 13 h 53 à 14 h 13
			Essai 2: de 15 h 51 à 16 h 09
			Essai 3: de 17 h 43 à 18 h 16
Prélèvement individuel Opérateur : M. POUVALOUR	Air des lieux de travail	Prélèvement actif Support adsorbant : charbon actif	Essai 1: de 13 h 53 à 14 h 18
			Essai 2: de 15 h 51 à 16 h 32
			Essai 3: de 17 h 43 à 18 h 16
		Prélèvement actif Support adsorbant : Filtre fibre de quartz	Essai 1: de 13 h 53 à 14 h 18
			Essai 2: de 15 h 51 à 16 h 32
			Essai 3: de 17 h 43 à 18 h 16
Prélèvement point fixe	Air ambiant	Prélèvement actif Support adsorbant : charbon actif	Essai 1: de 13 h 54 à 14 h 17
			Essai 2: de 15 h 52 à 16 h 12
			Essai 3: de 17 h 02 à 18 h 16
		Prélèvement actif Support adsorbant : Filtre fibre de quartz	Essai 1: de 13 h 54 à 14 h 17
			Essai 2: de 15 h 52 à 16 h 12
			Essai 3: de 17 h 02 à 18 h 16

Tableau n° 1 : méthodes et périodes de mesure

8.4.2 Méthodes et équipements

- **Mesure des COV (notamment benzène) par prélèvement actif**

Les mesures de concentration en **Composés Organiques Volatils dans l'air des lieux de travail (prélèvement individuel)** 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 X 43-267 *« Air des lieux de travail – Prélèvement et analyse de gaz et vapeurs organiques » et la méthode metropol 029 préconisée par l'institut National de Recherche et de Sécurité (INRS).*

Les mesures de concentration en **Composés Organiques Volatils dans l'air ambiant (prélèvement 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. Parie 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 de l'acide fluorhydrique par prélèvement actif**

Les mesures de concentration en **acide fluorhydrique dans l'air des lieux de travail (prélèvement individuel) et dans l'air ambiant (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 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.

8.4.3 Valeurs de référence

Les concentrations mesurées dans l'air des lieux de travail sont comparées aux valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) 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..., 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, 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 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 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 par encore entré en vigueur, bien qu'initialement prévu au 1e janvier 2012 (voir Circulaire DGT n° 2010-03 du 13/04/10 et article 13 du décret précité).

Le benzène et l'acide fluorhydrique possèdent une valeur limite réglementaire contraignante.

agents chimiques dangereux	type de valeur limite	VLEP 8 heures	VLCT
benzène	valeur limite réglementaire contraignante	**3,25 mg.m^{-3}**	
acide fluorhydrique	valeur limite réglementaire contraignante	**1,5 mg.m^{-3}**	**2,5 mg.m^{-3}**

Tableau n° 3 : valeur limite d'exposition professionnelle

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.

Résultat

Ce rapport ne concerne que les objets soumis à l'essai. Les incertitudes sur les résultats peuvent être fournies sur demande.

8.4.4 Essai 1 (véhicule ZOE)

mesure de concentration en chloroforme	prélèvement individuel opérateur : CEKANOWSKI	prélèvement individuel opérateur : POUVALOUR	prélèvement point fixe
date de prélèvement	20/01/12	20/01/12	20/01/12
période de prélèvement	de 13 h 53 à 14 h 13	de 13 h 53 à 14 h 18	de 13 h 54 à 14 h 17
durée de prélèvement en minutes	20	25	23
volume d'air prélevé en litres	benzène : 27,4 HF : 41,0	benzène : 33,1 HF : 51,6	benzène : 32,5 HF : 47,9
température moyenne en °C	8,6	8,6	8,6

pression atmosphérique moyenne en kPa	102,0	102,0	101,6
hygrométrie en %	69	69	69
concentration moyenne en mg.m^{-3}			
benzène *limite de détection : 0,010 mg.m^{-3}* *limite de quantification : 0,026mg.m^{-3}*	**0,24**	**0,12**	**< 0,027**
acide fluorhydrique *limite de détection : 0,10 mg.m^{-3}* *limite de quantification : 0,26mg.m^{-3}*	**1,7**	**< 0,20**	**< 0,21**

Tableau n° 4 : concentrations moyennes en mg.m^{-3}

8.4.5 Essai 2 (véhicule Kangoo ZE)

mesure de concentration en chloroforme	**prélèvement individuel opérateur : CEKANOWSKI**	**prélèvement individuel opérateur : POUVALOUR**	**prélèvement point fixe**
date de prélèvement	20/01/12	20/01/12	20/01/12
période de prélèvement	de 15 h 51 à 16 h 09	de 15 h 51 à 16 h 32	de 15 h 52 à 16 h 12
durée de prélèvement en minutes	18	41	20
volume d'air prélevé en litres	benzène : 24,9 HF : 37,2	benzène : 52,4 HF : 52,2	benzène : 28,1 HF : 42,2
température moyenne en °C	8,6	8,6	8,6
pression atmosphérique moyenne en kPa	102,0	102,0	101,6
hygrométrie en %	69	69	69
concentration moyenne en mg.m^{-3}			
benzène *limite de détection : 0,010 mg.m^{-3}* *limite de quantification : 0,026mg.m^{-3}*	**0,1**	**< 0,016**	**< 0,031**
acide fluorhydrique *limite de détection : 0,10 mg.m^{-3}* *limite de quantification : 0,26mg.m^{-3}*	**< 0,27**	**< 0,20**	**< 0,24**

Tableau n° 5 : concentrations moyennes en mg.m^{-3}

8.4.6 Essai 3 (véhicule Kangoo ZE)

mesure de concentration en chloroforme	**prélèvement individuel opérateur : CEKANOWSKI**	**prélèvement individuel opérateur : POUVALOUR**	**prélèvement point fixe**
date de prélèvement	20/01/12	20/01/12	20/01/12
période de prélèvement	de 17 h 43 à 18 h 16	de 17 h 43 à 18 h 16	de 17 h 02 à 18 h 16
durée de prélèvement en minutes	33	33	72
volume d'air prélevé en litres	benzène : 45,0 HF : 68,0	benzène : 46,2 HF : 67,5	benzène : 77,6 HF : 151,7
température moyenne en °C	8,6	8,6	8,6
pression atmosphérique moyenne en kPa	102,0	102,0	101,6
hygrométrie en %	69	69	69
concentration moyenne en mg.m^{-3}			
benzène *limite de détection : 0,010 mg.m^{-3}* *limite de quantification : 0,026mg.m^{-3}*	**0,02**	**0,09**	**< 0,01**
acide fluorhydrique *limite de détection : 0,10 mg.m^{-3}* *limite de quantification : 0,26mg.m^{-3}*	**0,38**	**0,85**	**< 0,065**

Tableau n° 6 : concentrations moyennes en mg.m^{-3}

8.4.7 Interprétation des résultats

Les concentrations mesurées correspondant à des durées variables, il convient, aux fins d'établir si la VLEP - 8 heures a été dépassée, de calculer la concentration moyenne pondérée sur 8 heures, pour chaque polluant et chaque opérateur, en faisant l'hypothèse que la journée de travail des pompiers est de 8 heures.

Pour réaliser ces calculs, deux scénarios d'exposition sont distingués :

- scénario 1 : les pompiers ont réalisé les opérations d'extinction, les essais 1, 2 et 3 étant réalisés des jours différents ou par des intervenants différents ;

- scénario 2 : les pompiers ont réalisé les opérations d'extinction sur les 3 essais le même jour et par les mêmes intervenants.

Dans ces conditions, les valeurs de concentrations moyennes pondérées obtenues sont rassemblées dans le tableau suivant :

concentrations moyennes pondérées sur 8 heures (mg/m^3)	**opérateur CEKANOWSKI**	**opérateur POUVALOUR**
essai 1		
benzène	0,01	0,007
acide fluorhydrique	0,08	< 0,01
essai 2		
benzène	0,004	< 0,001
acide fluorhydrique	< 0,01	< 0,01
essai 3		
benzène	< 0,001	0,007
acide fluorhydrique	0,031	0,064
essai 1 + essai 2 + essai 3		
benzène	0,015	0,014
acide fluorhydrique	0,110	0,070

9 Bilan

Le protocole d'essai a du être ajusté avant les tests du fait de la découverte tardive des véhicules, de leur implantation sur l'aire de feu et des conditions d'installation du PC mesure.

Effets thermiques

L'environnement thermique de la batterie de puissance a pu être mesuré pour un véhicule isolé, stationné à l'air libre. Les conclusions de l'étude ne sont représentatives que de cette configuration. Il ne peut être question de généraliser les résultats à des configurations différentes, telles que stationnement en parking couvert, présence d'autres véhicules à proximité immédiate, ou propagation d'un feu issu d'un autre véhicule.

Les mesures et observations effectuées permettent de constater que la destruction d'un véhicule de type KANGOO ZE par une mise de feu à l'intérieur du véhicule n'entraîne pas l'emballement thermique de la batterie. La dégradation de l'état de la batterie impose une surveillance de l'épave pour contrôler tout redémarrage de feu.

Les observations réalisées au moment de l'extinction de la ZOE ont permis de visualiser un début de combustion de la batterie. Des flammes de couleur caractéristique (bleu/vert) s'échappaient des orifices supérieurs du coffrage de la batterie situés sous les sièges arrière. Cependant, cette combustion a pu rapidement être maîtrisée par l'introduction massive d'eau dans ces orifices et empêcher l'emballement thermique généralisé de la batterie.

Lorsqu’un emballement thermique est atteint, la couleur caractéristique précitée de flamme est obtenue. Les secours peuvent ainsi repérer visuellement l'état de la batterie. Des crépitements sonores sont également perceptibles. Il a été constaté que l'extinction du deuxième véhicule KANGOO, dans ce cas, devient difficile du fait d'une combustion entretenue par les éléments actifs de la batterie et d'une inaccessibilité du coffrage batterie une fois le véhicule affaissé suite à la perte des amortisseurs et des pneumatiques. Il semble illusoire de prétendre à l'arrêt de la combustion de la batterie par refroidissement dans ces conditions où la mise en œuvre d'un pieu est par ailleurs impossible. Cette disposition tient vraisemblablement au fait que ce véhicule reprend un châssis existant, non prévu initialement pour accueillir un bloc batterie.

La solution adoptée pour la ZOE est différente. Si elle permet un accès plus aisé à la batterie pour les secours, elle a l'inconvénient de plus exposer cette batterie à un feu d'habitacle. Elle paraît toutefois préférable à la solution retenue pour le KANGOO.

Risques électriques

La dégradation des connecteurs électriques de la batterie n'a pas permis de mesurer la tension entre ses bornes actives.

On a vu que pour subir un choc électrique à partir de la tension produite par la batterie, il faut être relié simultanément au deux pôles + et - de la batterie. Ce risque de choc électrique dans une phase d'incendie ou après le sinistre semble minime. En effet, le plus probable est que les pôles positif et négatif se mettront en court-circuit notamment au moment de la destruction de la gaine isolante des câbles. Ce court-circuit aura pour effet de mettre hors d'usage la batterie et d'interrompre l'alimentation électrique.

Toutefois, en cas d'un accident ou de désincarcération, la rupture accidentelle du bus est possible et peut induire un choc sur les intervenants, voire sur l'automobiliste.

Par ailleurs, il y a eu de retenir qu'en situation de charge de la batterie, le véhicule présente les mêmes risques qu'un équipement électrique standard.

Et en cas de rupture du conducteur de terre, les protections contre les défauts électriques à la terre demeureront inefficaces. Et un contact sur la carcasse métallique mise sous la tension de charge lors d'un incendie sur la partie de l'alimentation du véhicule pourrait être fatal pour un intervenant.

En tout état de cause, ce risque pourrait être systématiquement évité par l'isolement du véhicule du réseau de la distribution publique par déconnexion physique du connecteur ou du câble de raccordement.

Une surveillance de l'état thermique de la batterie au moment de l'intervention peut être envisageable à l'aide d'une caméra thermographique. Il faut cependant intégrer que ces batteries fonctionnent normalement avec une température interne supérieure à 60 °C . L'enveloppe externe est toutefois proche de la température ambiante

Analyse des gaz émis

Les concentrations moyennes pondérées en benzène et acide fluorhydrique calculées dans la zone respiratoire des opérateurs, en supposant que la durée de leur journée de travail est égale à 8 heures, et en prenant comme situations d'expositions celles correspondant à la réalisation, au cours d'une journée, de l'un des trois essais ou de l'ensemble des trois essais (par les mêmes opérateurs), sont très nettement inférieures à la VLEP – 8 heures correspondant à chacun de ces polluants, et ce quelque soit le scénario envisagé.

Il convient de noter que, pour chacun des polluants, les concentrations pondérées se révèlent un peu plus élevées si les trois opérations d'extinction sont réalisées au cours d'une même journée que si elles sont réalisées séparément sur des jours distincts.

De plus, ces concentrations ne sont pas représentatives des conditions réelles d'exposition des intervenants, celles-ci ne pouvant que se trouver abaissées du fait que les intervenants (pompiers) sont totalement isolés de l'air ambiant puisqu'ils sont équipés d'appareil respiratoire isolant.

Par ailleurs, il n'a pas été possible de faire de comparaison des concentrations d'acide fluorhydrique à la VLCT-15 min, puisqu'aucune mesure n'a pu être réalisée sur 15 minutes.

En conclusion, les mesures réalisées pendant des opérations d'extinction de feux dans les situations définies montrent que les VLEP-8 h en benzène et acide fluorhydrique ne peuvent, du fait des dispositifs de protection individuels utilisés, être dépassées au niveau des voies respiratoires des intervenants (pompiers).

Eaux d'extinction

Les essais réalisés sur les prélèvements d'eaux permettent d'apporter un certain nombre d'informations sur la nature des composés susceptibles de se retrouver rejetés dans l'environnement.

Ces eaux d'extinction sont des eaux alcalines chargées en anions, cations, éléments métalliques et composés organiques.

Le lithium, le cobalt, le nickel, le manganèse et les fluorures ont été mis en évidence en concentration significative.

D'après nos constats et les éléments en notre possession, ces composés semblent principalement issus de la détérioration des batteries de type lithium-ion.

Si l'on compare les concentrations obtenues dans les eaux d'extinction avec celles des valeurs limites de rejet dans l'environnement pour les eaux usées (arrêté du 2 février 1998), on peut noter que pour huit paramètres, les valeurs mesurées sont non conformes (annexe 3). En effet :

- le pH mesuré pour le véhicule n°2 KANGOO est trop basique,
- les concentrations en fluorures, nickel et manganèse, fer, cuivre, zinc et aluminium sont supérieures aux seuils définis en moyenne mensuelle.

On peut souligner que concernant le manganèse et nickel, les concentrations mesurées pour le véhicule n°3 KANGOO ZE sont nettement supérieures aux seuils avec des rapports entre les valeurs compris entre 10 et 20. De plus, ces valeurs déjà très importantes sont certainement sous-estimées du fait des grands volumes d'eau d'extinction utilisés pour ce véhicule (phénomène de dilution).

D'autre part, des teneurs non négligeables ont été relevées pour les chlorures, le baryum, le méthanol, l'éthanol, le cobalt et le lithium.

Pour ces composés, nous ne disposons pas à ce jour de valeurs de comparaison dans les eaux usées nous permettant d'évaluer l'impact des concentrations retrouvées sur l'environnement.

Suite à un incendie de véhicules électriques tels que ceux testés au cours de ces essais, les eaux d'extinction susceptibles d'être rejetées dans l'environnement peuvent présenter des caractéristiques qui permettent de les considérer comme des sources potentielles de pollution. Toutefois ces sources restent des sources ponctuelles, la comparaison des valeurs mesurées a été effectuée par rapport à des valeurs de référence données pour des émissions qui sont fonction des volumes de rejets et qui correspondent à des moyennes mensuelles de concentration autorisées.

Si la récupération des eaux d'extinction est envisageable alors un retraitement par des sociétés spécialisées serait la meilleure des solutions. Dans le cas d'une impossibilité, un rinçage abondant à l'eau des zones est important afin d'éviter toute stagnation de poche d'eau dite polluée et avec un caractère potentiellement dangereux en cas d'ingestion par des êtres vivants.

Une information de la station d'épuration située en aval et des services de l'eau du secteur est également conseillée.

En conclusion, la difficulté essentielle semble concerner le traitement des véhicules sinistrés **qui n'ont pas atteint l'emballement thermique ou qui sont partiellement endommagés.** Il faut pouvoir les évacuer et les transporter vers des sites spécialisés (fourrières, entrepôts, constructeur,.) malgré un état instable. Des mesures devront être prises dans ce sens. Il apparaît que les constructeurs (CITROEN, BOLLORE et RENAULT) proposent une formation sur le sujet. Le contenu de ces formations devrait être fourni aux personnels chargés des enquêtes postincendie.

Il est à noter, enfin, que les nombreuses explosions imputables aux éléments pyrotechniques des airbags, les amortisseurs de roues ou de hayons, les prétensionneurs des ceintures de sécurité, les pneumatiques, sont identiques à celles des véhicules thermiques.

10 ANNEXE

10.1 Résultats des analyses d'eaux et du frottis

Le prélèvement 01/EC7855 (frottis véhicule n°1 ZOE) extrait par 50 ml d'eau ultra pure a été analysé uniquement par chromatographie et électrophorèse capillaire, les concentrations étant toutes inférieures à celles du blanc. Nous nous sommes limités à ces premiers résultats.

- Date de début d'analyse : 27/01/2012
- Date de fin d'analyse : 21/02/2012

PARAMÈTRES	MÉTHODES	UNITÉS	"Blanc" Eau	"Blanc" Sol	frottis V n°1 ZOE	Eau V n°1 ZOE	Eau V n°2 Kangoo ZE	Eau V n°3 Kangoo ZE
pH in situ	NF T 90-008 02/01	-	8,17 à 7,6 °C	/	/	8	11	8-9
Fluorures (sur eau filtrée)	NF T 90-004 08/02	F^- mg/L	Moins de 0,50	Moins de 0,50	/	3,5	1,2	22,5
Chlorures (sur eau filtrée)	NF EN ISO 10 304-1 (T 90-042-1) 07/09	Cl^- mg/L	22	24	/	2100	1600	160
Nitrates (sur eau filtrée)	NF EN ISO 10 304-1 (T 90-042-1) 07/09	NO_3^- mg/L	20	20	/	22	20	19
Nitrites (sur eau filtrée)	NF EN 26 777 (T 90-013) 05/93	NO_2^- mg/L	Moins de 0,10	Moins de 0,10	/	0,64	1,3	Moins de 0,10
Orthophosphates (sur eau filtrée)	NF EN ISO 10 304-1 (T 90-042-1) 07/09	P mg/L	Moins de 0,65	Moins de 0,98	/	Moins de 1,3	Environ 2,5	Moins de 1,3
Sulfates (sur eau filtrée)	NF EN ISO 10 304-1 (T 90-042-1) 07/09	SO_4^{2-} mg/L	51	53	/	130	120	76
Chlorate	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Thiocyanate	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Perchlorate	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Sodium	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	16	17	4	80	57	24
Ammonium	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	< 1	< 1	1	8	6	2
Potassium	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	2	5	2	46	12	9
Magnésium	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	7	7	2	14	8	10
Calcium	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	121	125	54	1390	1190	171
Strontium	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	< 1	< 1	< 1	2	1	< 1
Carbonate	Méthodes internes EXI_MOP0481 et EXI_MOP0482	mg/L	Présence	Présence	ND	Présence	ND	Présence
Thiosulfate	Méthodes internes EXI_MOP0371_rev06 et EXI_MOP0377_rev04	mg/L	ND	ND	ND	Présence	Présence	Présence

Examen par couplage chromatographie en phase gazeuse / spectrométrie de masse ; dosage par chromatographie en phase gazeuse (détecteur FID)

L'analyse a été effectuée sur les vapeurs en équilibre avec l'échantillon préalablement étuvé en vue de mettre en évidence les composés organiques volatils suivants :

PARAMÈTRES	MÉTHODES	UNITÉS	"Blanc" Eau	"Blanc"Terrain	Eau V n°1 ZOE	Eau V n°2 Kangoo ZE	Eau V n°3 Kangoo ZE
Benzène *.....	NF ISO 11423-1 09/97	µg/L	Absence ou teneur < 11	Absence ou teneur < 11	**50**	**15**	**33**
Toluène *.....	NF ISO 11423-1 09/97	µg/L	Absence ou teneur < 11	Absence ou teneur < 11	**30**	**Présence, teneur < 11**	**12**
Éthylbenzène *.....	NF ISO 11423-1 09/97	µg/L	Absence ou teneur < 11	Absence ou teneur < 11	**Présence, teneur < 11**	Absence ou teneur < 11	Absence ou teneur < 11
m-Xylène *.....	NF ISO 11423-1 09/97	µg/L	Absence ou teneur < 11	Absence ou teneur < 11	**Présence, teneur < 11**	**Présence, teneur < 11**	**Présence, teneur < 11**
o-Xylène *.....	NF ISO 11423-1 09/97	µg/L	Absence ou teneur < 11	Absence ou teneur < 11	**Présence, teneur < 11**	Absence ou teneur < 11	**Présence, teneur < 11**
Dichlorométhane	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 63	Absence ou teneur < 63	Absence ou teneur < 63	Absence ou teneur < 63	Absence ou teneur < 63
Chloroforme	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 70	Absence ou teneur < 70	Absence ou teneur < 70	Absence ou teneur < 70	Absence ou teneur < 70
Tétrachlorure de carbone	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 76	Absence ou teneur < 76	Absence ou teneur < 76	Absence ou teneur < 76	Absence ou teneur < 76
Trichloroéthylène	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 23	Absence ou teneur < 23	Absence ou teneur < 23	Absence ou teneur < 23	Absence ou teneur < 23
1,1,2-Trichloroéthane . .	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 90	Absence ou teneur < 90	Absence ou teneur < 90	Absence ou teneur < 90	Absence ou teneur < 90
Tétrachloroéthylène	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 21	Absence ou teneur < 21	Absence ou teneur < 21	Absence ou teneur < 21	Absence ou teneur < 21
trans-1,2-Dichloroéthylène	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 31	Absence ou teneur < 31	Absence ou teneur < 31	Absence ou teneur < 31	Absence ou teneur < 31
1,1-Dichloroéthane	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 37	Absence ou teneur < 37	Absence ou teneur < 37	Absence ou teneur < 37	Absence ou teneur < 37
cis-1,2-Dichloroéthylène	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 40	Absence ou teneur < 40	Absence ou teneur < 40	Absence ou teneur < 40	Absence ou teneur < 40
1,1,1-Trichloroéthane . .	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 60	Absence ou teneur < 60	Absence ou teneur < 60	Absence ou teneur < 60	Absence ou teneur < 60
1,2-Dichloroéthane	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 48	Absence ou teneur < 48	Absence ou teneur < 48	Absence ou teneur < 48	Absence ou teneur < 48
1,2-Dichloropropane	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 36	Absence ou teneur < 36	Absence ou teneur < 36	Absence ou teneur < 36	Absence ou teneur < 36
Chlorobenzène	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 17	Absence ou teneur < 17	Absence ou teneur < 17	Absence ou teneur < 17	Absence ou teneur < 17
1,4-Dichlorobenzène	NF EN ISO 10301 07/97	µg/L	Absence ou teneur < 24	Absence ou teneur < 24	Absence ou teneur < 24	Absence ou teneur < 24	Absence ou teneur < 24
Méthanol	Méthode interne LES_MOP0521r04	mg/L	Absence ou teneur < 3,8	Absence ou teneur < 3,8	**35**	**15**	Absence ou teneur < 3,8
Éthanol	Méthode interne LES_MOP0521r04	mg/L	Absence ou teneur < 3,8	Absence ou teneur < 3,8	**5,3**	**10**	**6,5**
Isopropanol	Méthode interne LES_MOP0521r04	mg/L	Absence ou teneur < 1,9	Absence ou teneur < 1,9	Absence ou teneur < 1,9	Absence ou teneur < 1,9	Absence ou teneur < 1,9
Propanol	Méthode interne LES_MOP0521r04	mg/L	Absence ou teneur < 2,3	Absence ou teneur < 2,3	Absence ou teneur < 2,3	Absence ou teneur < 2,3	Absence ou teneur < 2,3
Butanol	Méthode interne LES_MOP0521r04	mg/L	Absence ou teneur < 2,3	Absence ou teneur < 2,3	**Présence, teneur < 2,3**	Absence ou teneur < 2,3	Absence ou teneur < 2,3

Dosage des éléments totaux par Spectrométrie d'émission atomique avec plasma couplé par induction selon la norme NF EN ISO 11885 (T 90-136) de novembre 2009 après minéralisation selon la norme NF EN ISO 15587-1 (T 90-137-1) de mai 2002

PARAMÈTRES	**UNITÉS**	**"Blanc" Eau**	**"Blanc"Terrain**	**Eau V n°1 ZOE**	**Eau V n°2 Kangoo ZE**	**Eau V n°3 Kangoo ZE**
Aluminium	Al mg/L	Environ 0,1 à 0,8	Environ 1,9 à 2,3	Environ 23 à 30	Environ 26 à 31	Environ 16 à 21
Antimoine	Sb mg/L	Moins de 0,2	Moins de 0,2	Environ 2,4 à 2,8	Environ 1 à 1,2	Environ 0,3
Baryum	Ba mg/L	Moins de 0,4	Moins de 0,4	10,9	60,4	6,8
Cobalt.....	Co mg/L	Moins de 0,2	Moins de 0,2	Environ 0,2	Environ 0,5	Environ 3,1 à 3,6
Cuivre	Cu mg/L	Moins de 0,2	Moins de 0,2	Environ 2,7	Environ 2 à 2,4	Environ 1,4
Etain.....	Sn mg/L	Environ 0 à 0,1	Environ 0 à 0,3	Environ 0,2 à 0,3	Environ 0,8 à 1,1	Environ 0,2 à 0,4
Fer	Fe mg/L	Environ 0,3	Environ 2,5 à 3,1	Environ 2,2 à 2,5	Environ 11,9 à 12,3	Environ 11,8 à 13,3
Lithium.....	Li mg/L	Moins de 0,2	Moins de 0,2	0,2	Moins de 0,2	12,4
Manganèse	Mn mg/L	Moins de 0,4	Moins de 0,4	Moins de 0,4	1,54	87,8
Molybdène	Mn mg/L	Moins de 0,2	Moins de 0,2	Environ 0,4	Environ 0,5	Environ 0,1
Nickel	Ni mg/L	Moins de 0,2	Moins de 0,2	Moins de 0,2	Environ 0,2	Environ 7,0 à 9,0
Plomb	Pb mg/L	Environ 0,2	Environ 0 à 0,3	Environ 0 à 0,2	Environ 0,2 à 0,5	Environ 0 à 0,5
Zinc	Zn mg/L	Environ 0,2	Environ 0,2 à 0,3	Environ 28 à 31	Environ 100 à 116	Environ 63 à 73