BEATT Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre

RAPPORT D'ENQUÊTE TECHNIQUE

sur l'accident d'un véhicule électrique survenu le 11 décembre 2021 avenue d'Ivry à Paris (13e)

Novembre 2024

Avertissement

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre des articles L. 1621-1 à 1622-2 et R. 1621-1 à 1621-26 du Code des transports relatifs, notamment, aux enquêtes techniques après accident ou incident de transport terrestre.

Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents. Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités.

En conséquence, l'utilisation de ce rapport à d'autres fins que la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

Glossaire

- **ADAS** : Advanced Driving Assistance System
- **AEBS** : Automatic Emergency Breaking System
- **CAN** : Convertisseur Analogique Numérique
- **EDR** : Event Data Recorder
- **ESP** : Electronic Stability Program
- **IRCGN** : Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale
- **UNECE** : United Nations Economic Commission for Europe
- **VL** : Véhicule Léger
- **VUL** : Véhicule Utilitaire Léger

Bordereau documentaire

Organisme auteur : Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre (BEA-TT)

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur l'accident d'un véhicule électrique survenu le 11 décembre 2021 avenue d'Ivry à Paris (13e)

N° ISRN : EQ-BEAT—24--8--FR
Affaire n° BEATT-2021-14

Proposition de mots-clés : véhicule électrique, aide à la conduite, enregistrement des données, AEBS, freinage automatique

Synthèse

Le samedi 11 décembre 2021 à Paris (13e), vers 20 h 45, un véhicule léger de marque Tesla remonte l'avenue d'Ivry vers le nord. La chaussée a été aménagée par la ville de Paris pour permettre aux cyclistes de circuler en toute sécurité sur cet axe important. Depuis le boulevard Masséna jusqu'à la rue de Tolbiac, des glissières béton séparent physiquement les flux de véhicules routiers des cyclistes.

Bien que son véhicule soit fortement automatisé, le conducteur n'avait pas activé l'Autopilot, aide à la conduite permettant de contrôler les mouvements de la voiture dans les plans longitudinal et latéral. La conduite était manuelle.

À peu près au milieu de l'avenue d'Ivry, la voiture freine brusquement du fait de l'activation de l'AEBS, probablement du fait d'une réaction intempestive de ce système, car aucun obstacle proche n'est identifié par le conducteur. Pensant probablement qu'il s'agit du freinage à récupération associé à la pédale d'accélérateur, et pour éviter un arrêt du véhicule, le conducteur appuie fortement sur l'accélérateur sans s'en rendre compte. L'AEBS est désactivé et dès lors le véhicule accélère fortement.

Ne s'étant pas aperçu immédiatement de cet emballement, le conducteur panique et de fait maintient inconsciemment son pied sur l'accélérateur. Il arrive néanmoins à diriger son véhicule et au niveau d'un carrefour profite de l'absence de glissière béton pour s'insérer dans la piste cyclable qui est peu fréquentée, lui permettant d'éviter de heurter les autres véhicules routiers. Malgré la vitesse vertigineuse et l'étroitesse de la voie, il se maintient dans la piste cyclable tout en évitant les aménagements de stationnement de cycles en bord de rive du côté gauche et les glissières béton à droite.

Malheureusement, à 118 km/h, le véhicule heurte mortellement par l'arrière un cycliste qui circule vers le nord. Arrivant en bout de la piste cyclable, il heurte alors à 140 km/h le mobilier urbain, dont un container à verre qui explosera, blessant une vingtaine de personnes présentes dans le carrefour. Il sera définitivement stoppé après le choc avec un véhicule utilitaire léger dans le carrefour avec la rue de Tolbiac.

La cause principale de l'accident a été l'incapacité du conducteur à comprendre son erreur d'appui sur la pédale d'accélérateur au lieu de la pédale de frein. Paniqué par une telle accélération, il n'a pas pu réagir à son environnement ni tenter une action pour remédier à cette accélération, y compris enlever le pied de l'accélérateur.

Les facteurs ayant participé à l'accident ont été le fait de pouvoir désactiver le freinage automatique de l'AEBS par une action sur l'accélérateur, et la méconnaissance par le conducteur du fonctionnement et des performances du véhicule.

Le BEA-TT propose des orientations de sécurité en lien avec ces facteurs, et d'application plus générale, une modification des données de l'Event Data Recorder (EDR), équipement destiné à enregistrer certains paramètres cinématiques et de fonctionnement des systèmes équipant les nouveaux véhicules.

SOMMAIRE

SYNTHÈSE **1**

1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE **3**

1.1 - Les circonstances de l'accident 3

1.2 - Le bilan humain et matériel 4

1.3 - L'engagement et l'organisation de l'enquête 4

1.4 - Les mesures prises après l'accident 4

2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT **5**

2.1 - Les conditions météorologiques 5

2.2 - L'infrastructure et l'environnement 5

3 - COMPTE RENDU DES INVESTIGATIONS EFFECTUÉES **7**

3.1 - L'état des lieux après l'accident 7

3.2 - Les résumés des témoignages 11

3.2.1 - Le témoignage du conducteur de la Tesla 12

3.2.2 - Le témoignage de l'épouse 13

3.2.3 - Le témoignage de la belle-fille 13

3.2.4 - Le témoignage de personnes présentes sur les lieux des accidents 14

3.3 - Le véhicule léger impliqué et son conducteur 15

3.3.1 - Les caractéristiques générales du véhicule léger 15

3.3.2 - Freinage à récupération 18

3.3.3 - Les aides à la conduite équipant le véhicule 19

3.3.4 - Performances de l'AEBS mesurées par Tesla 26

3.3.5 - Le conducteur du véhicule léger 26

3.3.6 - Le trajet d'approche du véhicule léger 27

3.4 - L'analyse des enregistrements 27

3.4.1 - Les données récupérées par télétransmission 27

3.4.2 - Les données récupérées sur la voiture et l'analyse mécanique de celle-ci 44

4 - ANALYSE DU DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT **46**

5 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES **48**

5.1 - Analyse critique des données de l'EDR et du fichier log 48

5.1.1 - Données de l'EDR 48

5.1.2 - Données du fichier log 53

5.2 - Fonctionnement et interface homme-machine de l'AEBS 54

5.2.1 - Performances et limites des AEBS 55

5.2.2 - Signaux émis à destination du conducteur 56

5.3 - Absence de réactions du conducteur 58

6 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS **61**

ANNEXES **62**

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête 63

Annexe 2 : Fiche EuroNcap du véhicule Tesla modèle 3 -Extraits 64

RÈGLEMENT GÉNÉRAL DE PROTECTION DES DONNÉES **65**

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - Les circonstances de l'accident

Le samedi 11 décembre 2021 à Paris (13e), vers 20 h 45, un véhicule léger taxi de marque Tesla venant du périphérique sud circulait dans l'avenue d'Ivry en direction de la place d'Italie. Le conducteur et trois membres de sa famille sont présents à bord. Alors que le véhicule avançait à faible vitesse à près de 500 m en amont de la rue de Tolbiac, celui-ci a accéléré brusquement et de manière continue.

Pour éviter de percuter les véhicules circulant à une dizaine de mètres devant lui, le conducteur a quitté la seule voie de circulation de l'avenue d'Ivry ouverte aux véhicules routiers et s'est inséré dans la piste cyclable aménagée par la ville de Paris sur la partie gauche de la chaussée. À vitesse élevée et toujours en accélération, le véhicule est resté dans cette voie mais n'a pas pu éviter un cycliste qui y circulait et l'a mortellement percuté.

Quelques secondes plus tard, à une vitesse proche de 140 km/h, le véhicule léger a percuté divers éléments de mobilier urbain puis a stoppé sa course au milieu du carrefour entre la rue de Tolbiac et l'avenue d'Ivry après avoir heurté violemment un véhicule utilitaire léger (VUL) en circulation.

Figure 1 : plan de situation de l'accident
(source : Géoportail IGN légendé BEA-TT)

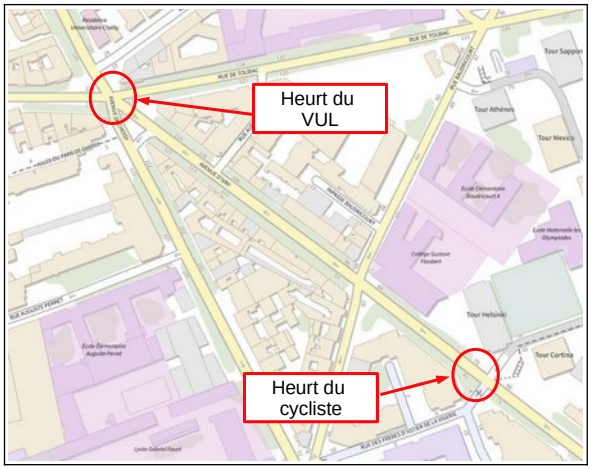


Figure 2 : plan de situation de l'accident
(source : Géoportail IGN légendé BEA-TT)

1.2 - Le bilan humain et matériel

L'accident a provoqué le décès d'un homme qui circulait en Vélib' dans la partie de l'avenue d'Ivry aménagée en piste cyclable, percuté à l'arrière par le véhicule léger qui circulait à une vitesse d'environ 120 km/h.

Le véhicule léger en fin de course a percuté un poteau de signalisation verticale, un poteau de feu de passage piéton, divers mobiliers urbain, des cycles Vélib' stationnés sur l'emplacement dédié, un conteneur à verre, et un VUL qui a été fortement endommagé à l'avant. Le véhicule de marque Tesla a été détruit, mais l'habitacle a protégé les trois passagères et le conducteur qui ont été blessés légèrement.

Les différents chocs et les projections de débris ont occasionné des blessures graves à plusieurs piétons et endommagé deux VL présents au moment de l'accident. Les derniers recensements immédiatement après le traitement des victimes indiquaient, en plus du cycliste décédé et des passagers du véhicule Tesla, 6 personnes en urgence absolue et 9 en urgence relative dont deux ont été laissées sur place, les autres ayant été évacuées dans les hôpitaux.

1.3 - L'engagement et l'organisation de l'enquête

Au vu des circonstances de cet accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert le 17 décembre 2021 une enquête technique en application des articles L. 1621-1 à L. 1622-2 et R. 1621-1 à R. 1621-26 du Code des transports.

Les enquêteurs du BEA-TT ont contacté les autorités judiciaires et ont pu accéder au dossier de l'enquête judiciaire dirigée par le procureur de la République. Ils ont pu rencontrer les policiers chargés de l'enquête de flagrance ainsi que les gendarmes de l'Institut de recherche criminelle chargés de certaines expertises du véhicule Tesla, et prendre connaissance des résultats de leurs expertises.

La société Tesla a également adressé certains fichiers de données enregistrées à bord du véhicule et a répondu à l'ensemble des questions du BEA-TT en fournissant des documents explicatifs associés.

1.4 - Les mesures prises après l'accident

La compagnie de taxis G7 employeur du conducteur accidenté a décidé le lendemain de l'accident de mettre à l'arrêt les 37 Tesla Model 3 de sa flotte le temps que l'enquête détermine les causes de l'événement, en application du principe de précaution.

Par la suite, la compagnie G7 dans une interview du journal Caradisiac[1] indiquait avoir fait appel à un expert automobile indépendant, lequel a examiné plusieurs voitures Model 3 exploitées par ses chauffeurs. L'expert n'a relevé aucune défaillance mais a constaté la particularité de la Tesla, induisant la nécessité d'une formation des conducteurs.

1 https://www.caradisiac.com/exclusif-caradisiac-pourquoi-les-taxis-g7-ont-remis-en-service-leurs-tesla-model-3-195114.htm

2 - Contexte de l’accident

2.1 - Les conditions météorologiques

Le relevé de la station météorologique d’Orly, située à environ 12 km au sud du lieu de l’accident affichait pour le samedi 11 décembre 2021 à 19 h, heure locale, une température extérieure positive de 5 °C, aucune précipitation dans l’heure précédente. Le sol était sec.

À 22 h, le relevé météorologique indiquait une température positive de 5 °C et ne faisait état d’aucune précipitation dans les 3 heures précédentes.

Les différents témoins de l’accident interrogés par les services de police indiquaient qu’il faisait nuit et qu’il ne pleuvait pas. Toutefois, certains ont indiqué que la chaussée était humide.

2.2 - L’infrastructure et l’environnement

L’avenue d’Ivry, longue d’environ 800 m, relie le boulevard Masséna, au sud, au carrefour entre l’avenue de Choisy et la rue de Tolbiac, lieu où le véhicule Tesla a terminé sa course. Route à sens unique, elle comportait sur toute sa longueur une voie cycliste à double sens aménagée sur la partie gauche de la chaussée en bordure de trottoir. Cette voie était séparée de la chaussée empruntée par les autres véhicules par des glissières de béton et des balises de couleur jaune à bandes blanches. Une signalisation horizontale temporaire de couleur jaune marquait les limites de la voie cycliste de part et d’autre des blocs béton. La vitesse maximale autorisée pour les véhicules routiers était de 30 km/h.

Par endroit, la piste cyclable se rétrécissait, sa largeur dépendant des contours du trottoir ou des limites des aménagements présents.

Sur le côté droit dans le sens de circulation, la chaussée comportait des places de parking, des zones de stationnement Vélib’ ou des containers, réduisant de fait sa largeur à une seule voie de circulation.

Figure 3 : photo de gauche, début de l’avenue d’Ivry au niveau du boulevard Masséna
photo de droite, divers aménagements présents en bord de chaussée dans l’avenue d’Ivry
(source : google maps-août 2022)

À l’approche du carrefour avec la rue de Tolbiac, la piste cyclable se rétrécissait et le mobilier urbain se densifiait sur le trottoir avec la présence de poteaux, de panneaux, d’arbres, d’une station Vélib’ et d’un bac à verre.

Figure 4 : vue de l’avenue d’Ivry à l’approche du carrefour avec la rue de Tolbiac
(source : google maps-mars 2023)

L’avenue d’Ivry est un des principaux axes du quartier en direction du centre de Paris, et les commerces et restaurants de type asiatique sont nombreux. Au moment de l’accident, le trafic était toutefois fluide.

3 - Compte rendu des investigations effectuées

3.1 - L'état des lieux après l'accident

Au niveau de la zone de choc présumée avec le cycliste sur la piste cyclable, aucune trace de freinage ou de ripage n'apparaît sur la chaussée. Aucun équipement ou mobilier urbain sur le trottoir n'a été abîmé ou défoncé.

Figure 5 : zone de choc avec le cycliste
(source : google maps - août 2022 retouchée BEA-TT)

Les services de police sur place ont toutefois repéré une marque sur le côté gauche du premier bloc de béton séparant la voie cyclable de celle circulée par les véhicules routiers en aval de la zone de choc présumée.

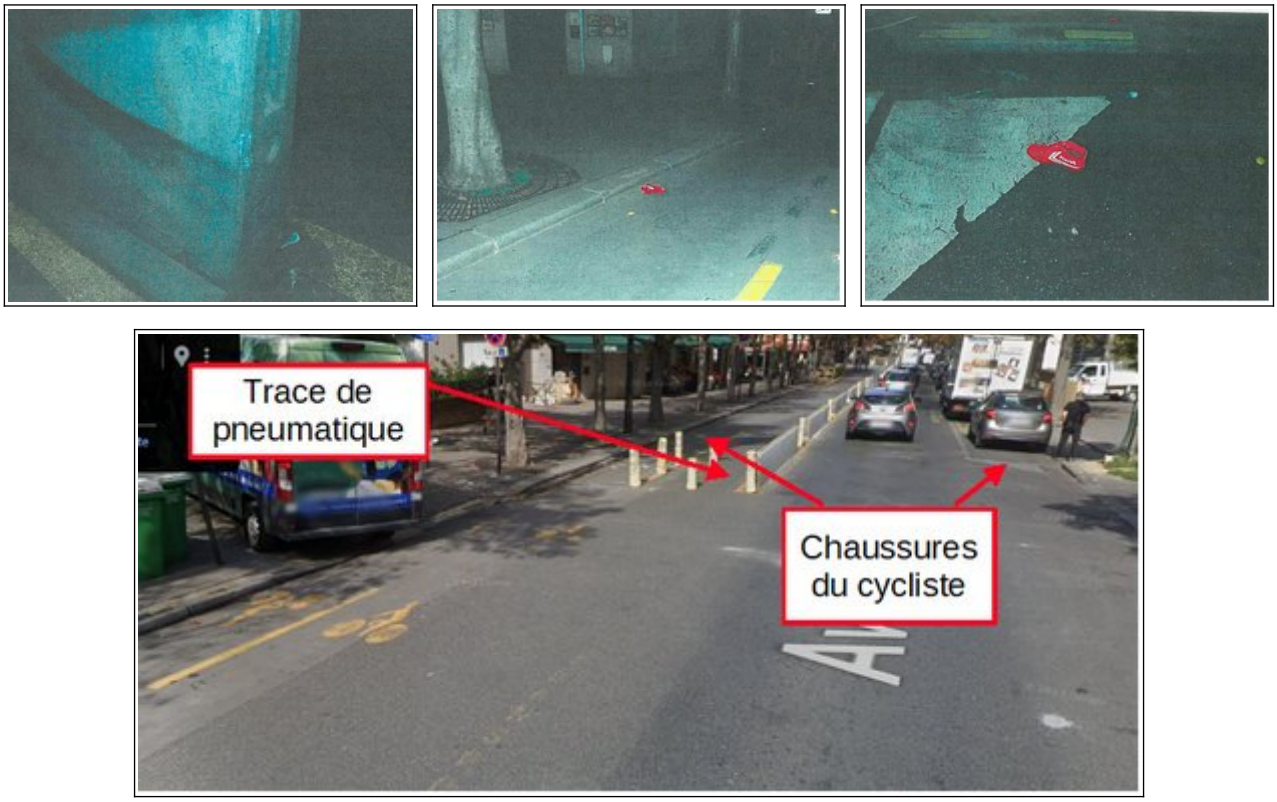


Figure 6 : trace noire sur le côté du bloc béton au niveau de la zone de choc avec le cycliste, emplacement relevé des chaussures gauche et droite du cycliste
(source : police nationale et google maps - août 2022 légendée BEA-TT)

Après le choc, la partie avant du Vélib', sectionnée au niveau du pédalier, se trouvait sur le trottoir de droite en direction du nord, la roue arrière droite était légèrement en amont sur le même trottoir, et d'autres débris se trouvaient sur le trottoir de gauche pratiquement en vis-à-vis de la structure du Vélib'.

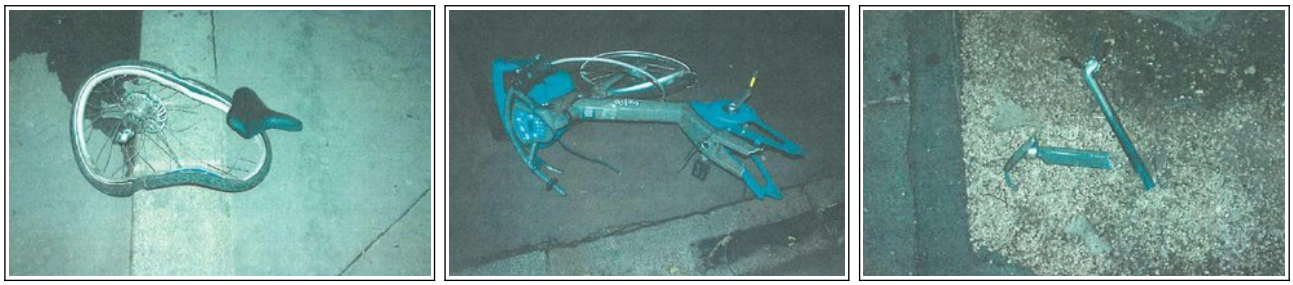


Figure 7 : roue arrière, avant de la structure du Vélib' et pièces métalliques de la partie arrière
(source : police nationale)

La figure 8 présente des vues des avenues d'Ivry et de Choisy et de la rue de Tolbiac prises par une caméra de surveillance de la ville de Paris respectivement 10 secondes et 1 seconde avant l'arrivée du véhicule Tesla sur ce carrefour. L'horloge indiquait 20h43.

Figure 8 : vues des avenues d'Ivry et de Choisy (photo de gauche) et de la rue de Tolbiac (photo de droite) quelques secondes avant les chocs
(source : police nationale légendées BEA-TT)

Les figures suivantes présentent quelques secondes après les chocs, l'état de la zone d'accident avec la position du véhicule Tesla, celle du véhicule utilitaire percuté, les dégâts aux équipements et mobilier urbain, des piétons blessés et d'autres qui leur portent secours.

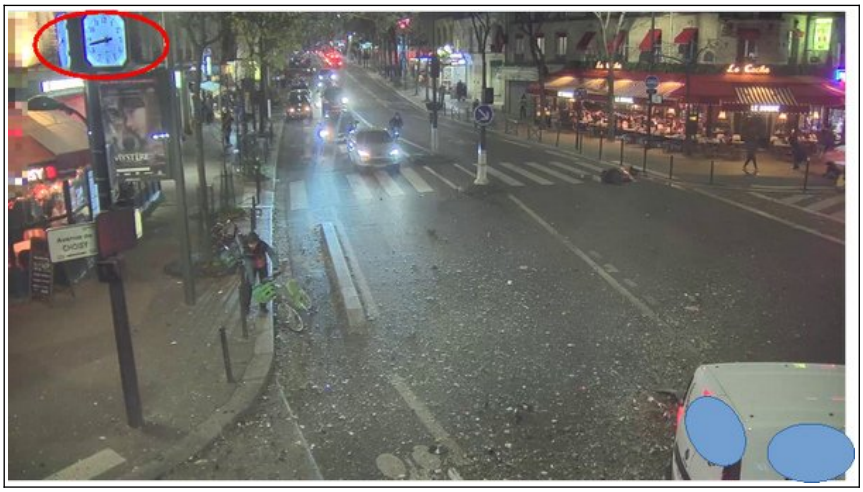


Figure 9 : vue de la rue de Tolbiac
(source : police nationale retouchée BEA-TT)

Figure 10 : vue du carrefour après l'accident
(source : police nationale légendée BEA-TT)

Figure 11 : vue du carrefour après l'accident
(source : police nationale légendée BEA-TT)

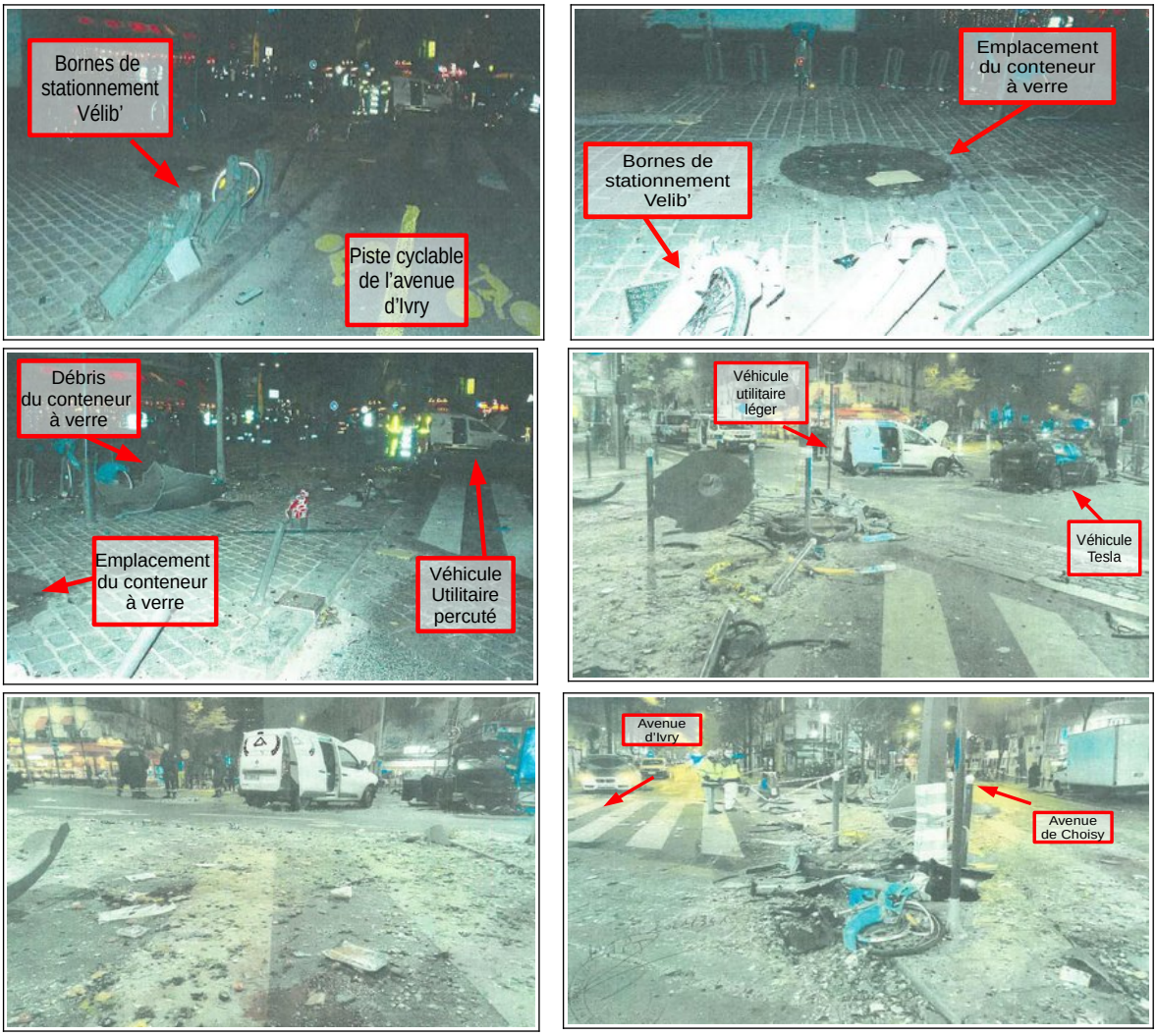


Figure 12 : vues successives du carrefour après l'accident depuis l'avenue d'Ivry
(source : police nationale légendées BEA-TT)

L'avant du véhicule Tesla est totalement détruit, son côté gauche fortement embouti. L'ensemble des airbags du véhicule se sont activés, en particulier ceux latéraux, qui ont permis au conducteur et aux passagères d'être protégés des chocs et des débris, et de n'être que légèrement blessés malgré la vitesse très élevée.

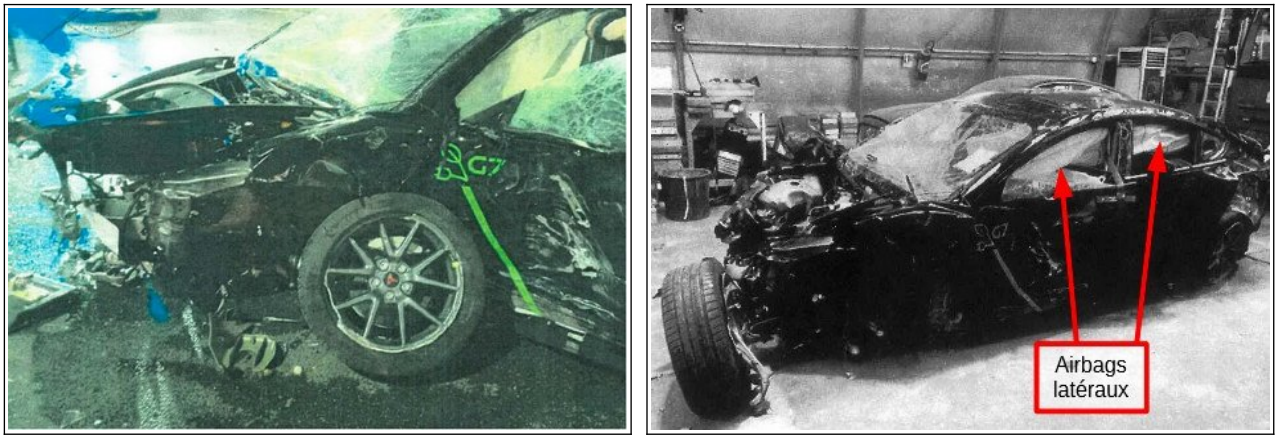


Figure 13 : vue du côté gauche du véhicule Tesla et de l'avant du véhicule utilitaire percuté
(source : photos police nationale – légendées BEA-TT)

En particulier, la roue gauche du véhicule Tesla n'est plus en place et sa jante présente sur son bord extérieur des déformations et des traces de frottement. Le compartiment avant est éventré et les structures ont reculé vers l'habitacle. Le pare-brise avant présente un enfoncement vers l'intérieur sur son côté droit, attestant d'un point d'impact, et est brisé sur toute sa surface.

Le côté gauche du véhicule présente des enfoncements sur toute sa longueur, la portière conducteur déformée ne peut plus se refermer et sa vitre est brisée et n'est plus en place. Celle de la portière arrière est absente. La jante arrière gauche est cassée à plusieurs endroits de son bord extérieur, et le pneumatique est crevé.

Le pare-choc arrière côté gauche est cassé et laisse apparaître sa structure interne. Le côté droit du véhicule présente surtout des traces de frottement notamment sur les deux portières, ainsi qu'au niveau du passage de roue arrière. L'aile avant droite est manquante. Le toit du véhicule, en verre teinté présente des enfoncements vers l'intérieur de l'habitacle au niveau des montants latéraux entre portières.

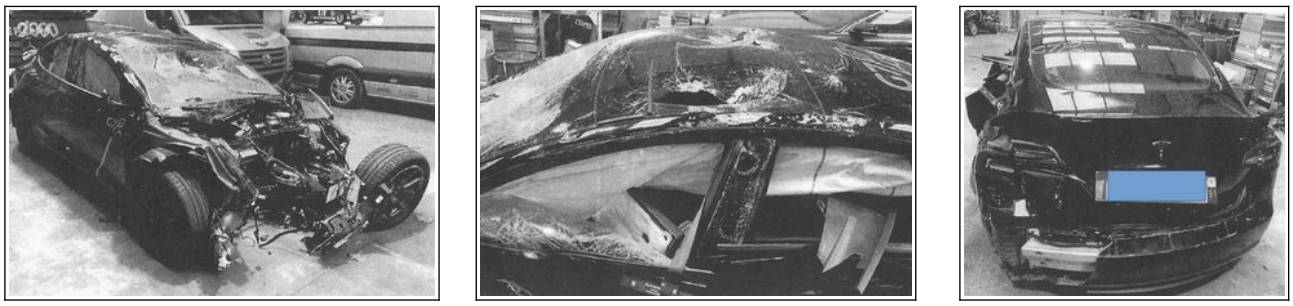


Figure 14 : dégâts du véhicule Tesla *(source : police nationale)*

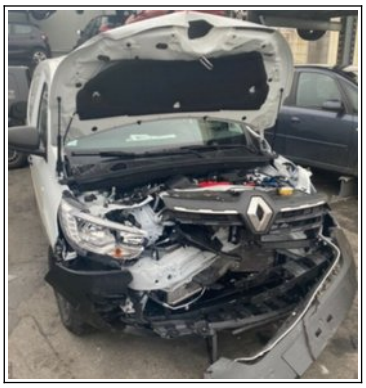


Figure 15 : dégâts du véhicule utilitaire léger *(source : police nationale)*

Le choc au niveau du VUL a entraîné des dégâts principalement à l'avant, détruisant le radiateur, la traverse, le bouclier, le capot et le phare gauche qui a été arraché, celui de droite, toujours en place, a été cassé. Le véhicule Tesla a heurté ce véhicule à peu près au milieu de la face avant, suivant un angle faible de l'ordre de 30° sur la droite par rapport à l'axe longitudinal du VUL.

3.2 - Les résumés des témoignages

Les résumés des témoignages présentés ci-dessous sont établis par les enquêteurs techniques sur la base des déclarations, orales ou écrites, dont ils ont eu connaissance.
Ils ne retiennent que les éléments qui paraissent utiles pour éclairer la compréhension et l'analyse des événements et pour formuler des recommandations. Il peut exister des divergences entre les différents témoignages recueillis ou entre ceux-ci et des constats ou analyses présentés par ailleurs.

3.2.1 - Le témoignage du conducteur de la Tesla

NB : plusieurs interrogatoires ont eu lieu, et certaines informations sont contradictoires. Toutefois, le BEA-TT met en avant les informations qui peuvent expliquer les circonstances en lien avec le fonctionnement du véhicule.

Comme tous les matins, il a exercé sa profession de taxi dans une plage horaire dès 8 h et jusqu'à 18 h. À 19 h, il a rejoint sa femme, sa fille et sa belle-fille qui assistaient à un office religieux à Saint-Ouen. Par la suite, ils se sont dirigés vers le 13e arrondissement de Paris, par le périphérique intérieur, pour dîner. Sa femme était assise sur le siège passager et les deux filles à l'arrière, chacun avait attaché sa ceinture de sécurité.

À un feu rouge dans l'avenue d'Ivry, il a accéléré doucement pour redémarrer au changement de couleur du feu tricolore après avoir actionné la manette du volant côté droit une seule fois vers le bas pour pouvoir avancer. Il a alors accéléré et la voiture a roulé sur 2 ou 3 mètres à une vitesse qu'il considère comme normale puis brusquement après avoir entendu un bruit de moteur, s'est mise à accélérer fortement. La voiture « a roulé toute seule ». Il a essayé de freiner, y compris avec les deux pieds, mais la pédale était « dure » et ne s'enfonçait pas, le véhicule continuant d'avancer comme une « voiture fantôme » à une vitesse élevée. En revanche, la voiture répondait correctement aux rotations du volant. Il s'est alors dirigé vers des plots jaunes en plastique pensant que cette manœuvre pourrait freiner la voiture en activant le freinage automatique. À l'intérieur de l'habitacle, les passagères criaient et il leur répondait ne pas réussir à l'arrêter.

À la question de savoir si le véhicule s'arrête devant un obstacle malgré la pédale d'accélérateur enfoncée, il a répondu que la voiture est censée s'arrêter.

Focalisé sur des manœuvres de direction pour éviter de heurter des personnes sur sa trajectoire, il n'a pas pu klaxonner pour alerter. À un moment son véhicule a percuté un autre de couleur blanche en fin d'avenue d'Ivry, puis s'est arrêté. Il a estimé que le temps mis depuis sa perte de contrôle jusqu'à ce moment a duré 2 à 3 minutes.

Bloqués à l'intérieur de l'habitacle, ne pouvant déverrouiller les portières, des témoins les ont aidés à sortir. Le test de dépistage d'alcoolémie pratiqué par analyse de sang a été négatif.

Il lui semblait que la chaussée était en bon état, légèrement humide, il faisait nuit, l'éclairage public était suffisant, et le trafic faible.

Il a acheté le véhicule Tesla par un crédit en leasing en août 2021, soit environ 4 mois avant l'accident, pour lequel il remboursait des mensualités. Ce véhicule, acquis neuf, était le premier véhicule totalement électrique qu'il conduisait, mais il précise qu'il a conduit des voitures à boîte automatique depuis 20 ans, la dernière ayant été une voiture hybride rechargeable. D'après lui il a parcouru environ 20 000 km depuis son achat et utilise le véhicule pour ses déplacements professionnels et personnels. Pendant cette journée, il n'a constaté aucun défaut de fonctionnement.

Dans ce véhicule, le levier de commande est au niveau du volant, il faut le lever pour faire une marche arrière et l'abaisser pour avancer. Il n'y a que deux pédales, celle de l'accélérateur et celle du frein, qui sont suffisamment espacées ; on ne peut pas se tromper de pédale. Lorsque celle de l'accélérateur est relâchée, la voiture ralentit. Bien que cette décélération soit plus importante que sur d'autres voitures, il utilisait la pédale de frein.

Il a indiqué aussi que la mise à jour du logiciel de la voiture nécessite un appui de sa part sur l'icône correspondant affiché sur le tableau de bord. La dernière mise à jour datait de 2 ou 3 jours.

Aucune formation particulière ne lui a été proposée par Tesla quand il a acquis le véhicule.

Il a confirmé que le mode automatisé ou Autopilot n'était pas enclenché, et qu'il est nécessaire pour l'activer d'abaisser une première fois la manette sur le volant pour engager le mode de conduite normale, puis une deuxième fois pour enclencher le régulateur de vitesse, et une troisième fois pour enclencher le mode automatisé. Il a indiqué n'avoir enclenché la manette qu'une seule fois. En revanche il pense avoir relevé le levier de vitesse pour le mettre au point mort mais n'en est pas sûr vu son état de panique à ce moment-là.

Concernant le régulateur dynamique de vitesse, il a indiqué l'avoir utilisé sur l'autoroute et avoir programmé une vitesse maximale de 110 km/h. Il a également indiqué que la voiture n'était pas équipée d'un frein à main mais qu'il a appuyé sur le bouton en bout du levier de vitesse à plusieurs reprises lors de l'accélération incontrôlée mais sans incidence sur la vitesse.

Enfin il n'a pas de souvenir du moment du choc avec le cycliste car « c'est allé trop vite ».

3.2.2 - Le témoignage de l'épouse

Le conducteur a travaillé de 8 h à 19 h. À la fin de la journée, il l'a rejointe ainsi que ses deux filles porte de Saint-Ouen comme tous les samedis. Elle s'est assise à l'avant et les deux filles à l'arrière, puis ils ont emprunté le périphérique et se sont dirigés vers le 13^{e} arrondissement de Paris. Il faisait nuit, il ne pleuvait pas, la route était sèche et la visibilité normale. Après un redémarrage à un feu tricolore, elle a questionné son mari sur sa conduite rapide qui n'était pas normale et lui a demandé de ralentir. Il lui a répondu « je ne sais pas pourquoi, mais je ne peux pas freiner ». La voiture continuait d'accélérer et le conducteur a dit qu'elle ne pouvait pas s'arrêter. Elle a crié, a eu peur et au moment de heurter un camion les airbags se sont déclenchés. Des personnes les ont aidés à évacuer le véhicule. Le conducteur n'était pas blessé mais choqué.

Elle a indiqué que son mari conduit très bien, qu'il a peut-être déjà eu des accidents matériels mais sans gravité. Elle décrit un problème de vitesse qui est apparu brusquement, très tôt après le feu tricolore, et qui a continuellement augmenté. Son mari tenait le volant, elle a constaté qu'il braquait de part et d'autre et voulait éviter les gens, les vélos et les voitures garées d'un côté.

3.2.3 - Le témoignage de la belle-fille

Assise à l'arrière gauche, elle s'est endormie pendant le trajet et s'est réveillée quelques minutes avant que la voiture n'accélère. À un moment où la voiture s'est arrêtée et a redémarré, elle a entendu un bruit bref, identique à celui lors de la réception d'un message sur un téléphone portable, puis le véhicule a fortement accéléré. Sa mère ainsi que sa sœur ont demandé alors au conducteur de ralentir, mais celui-ci a répondu ne pas pouvoir freiner. La voiture roulant très vite, elle a compris que le conducteur ne pouvait rien contrôler. Elle ne pense pas que la conduite autonome était active car pendant le trajet entre le nord et le sud de Paris, elle a pu constater que le conducteur contrôlait totalement le véhicule. Elle a indiqué qu'il était chauffeur de taxi depuis 30 ans et qu'il n'avait jamais eu d'accident, elle considère qu'ils étaient victimes de la voiture.

3.2.4 - Le témoignage de personnes présentes sur les lieux des accidents

Pour un témoin à vélo circulant dans la rue de Tolbiac en direction de l'est, il était 20 h 42, l'accident a débuté avenue d'Ivry pour se terminer au milieu du carrefour avec la rue de Tolbiac. Le véhicule Tesla a percuté en premier lieu la station de Vélib', un conteneur à verre et un feu de signalisation.

Dans les secondes qui ont précédé les chocs, le témoin était arrêté au feu tricolore au niveau du carrefour avec l'avenue d'Ivry puis a redémarré lorsque le feu est passé au vert. Dans les fractions de secondes juste après son redémarrage, le véhicule Tesla lui est passé brusquement devant à vitesse très élevée, le surprenant. Il a constaté que le chauffeur, une fois à l'extérieur de son véhicule, paraissait catastrophé et choqué.

Un témoin ayant assisté au heurt du cycliste marchait sur le trottoir de gauche dans le sens de circulation à hauteur du bâtiment sis au 80 avenue d'Ivry. À un moment, il a entendu derrière lui un bruit anormal, comme celui d'une « cocotte-minute ». Se retournant, il a aperçu une voiture se décaler sur la gauche dans la voie cyclable à allure rapide et en accélération, probablement pour éviter des véhicules qui circulaient devant lui. Une fois dans la voie cyclable, il a aperçu des étincelles s'échapper du véhicule mais sans pouvoir en préciser la localisation.

Arrivant à sa hauteur, il a vu que le véhicule était de marque Tesla et l'a vu ensuite percuter à vitesse élevée, qu'il estime à plus de 100 km/h, un cycliste qui circulait dans la piste cyclable légèrement en aval de sa position. Sous le choc, le cycliste a été projeté en l'air, et le véhicule Tesla a continué sa course dans la piste cyclable. Il s'est ensuite approché du cycliste pour lui venir en aide ; il gisait sur le dos sur la droite de la chaussée empruntée par les voitures. Il avait une plaie importante à la tête d'où s'échappait abondamment du sang. Pendant 4 minutes il a essayé de joindre le numéro d'urgence 112 sans réponse, puis a pu joindre le 18 à 20 h 51.

Le vélo a été disloqué, la roue arrière se trouvait sur le trottoir de droite, la partie avant sur le trottoir de gauche.

Un autre témoin présent sur le trottoir de gauche a précisé que les étincelles étaient situées à l'avant droit du véhicule qui frottait contre les blocs de béton délimitant les voies de circulation.

Au niveau du carrefour entre l'avenue d'Ivry et la rue de Tolbiac, un témoin se déplaçant sur le trottoir de droite (dans le sens de circulation) de l'avenue de Choisy, vers le sud, a relaté avoir vu un véhicule rouler à très vive allure et décoller au niveau du carrefour probablement après avoir heurté les bornes métalliques dédiées au stationnement des Vélib'. Il estime que la camionnette blanche percutée par le véhicule a permis de l'arrêter et d'éviter que celui-ci ne termine sa course dans le bar-restaurant situé à l'angle de la rue de Tolbiac et de l'avenue d'Ivry de l'autre côté du carrefour.

Un témoin conducteur d'un véhicule arrêté dans l'avenue d'Ivry a aperçu un véhicule de couleur noire tous feux éteints qui circulait à vitesse élevée dans la piste cyclable. Arrivant sur le terre-plein central en bout de l'avenue, le véhicule Tesla a renversé un piéton qui s'y trouvait et percuté un feu de signalisation.

Un dernier témoin a indiqué qu'au moment de traverser l'avenue d'Ivry au niveau du carrefour parallèlement à la rue de Tolbiac, un véhicule circulait rapidement, à environ 200 km/h, dans la piste cyclable en direction du carrefour. Il lui a semblé que le conducteur ne maîtrisait plus son véhicule et qu'il essayait d'éviter ceux dans la voie de circulation, d'où le choc avec les équipements de Vélib' et le mobilier urbain du terre-plein séparant l'avenue d'Ivry de celle de Choisy. Il ne lui a pas semblé que le conducteur roulait vite volontairement.

3.3 - Le véhicule léger impliqué et son conducteur

Cette partie a pour but de faire une synthèse du manuel du conducteur (document de 307 pages) et des documents récupérés par le BEA-TT auprès de Tesla, dans le but d'apporter des éléments de compréhension du fonctionnement des équipements installés à bord du véhicule accidenté.

3.3.1 - Les caractéristiques générales du véhicule léger

Le véhicule léger impliqué est de marque Tesla et de modèle « Model 3 », mis en circulation le 26 août 2021, soit un peu plus de trois mois avant l'accident.

Le propriétaire déclaré sur la carte grise est l'organisme BPCE Lease, filiale de la banque éponyme. Le conducteur payait des mensualités et avait assuré le véhicule auprès de la société Aviva dont le certificat était valide jusqu'en septembre 2022.

Le véhicule possédait cinq portes et pouvait transporter cinq personnes y compris le conducteur. D'une longueur totale de 4,69 m, d'une largeur totale de 1,85 m et d'une masse en charge maximale techniquement admissible de 2 139 kg, il a été fabriqué le 15 juillet 2021 et dispose d'un certificat de conformité aux règlements européens pour la réception des véhicules, établi par le service technique national hollandais RDW (the Netherlands Vehicle Authority).

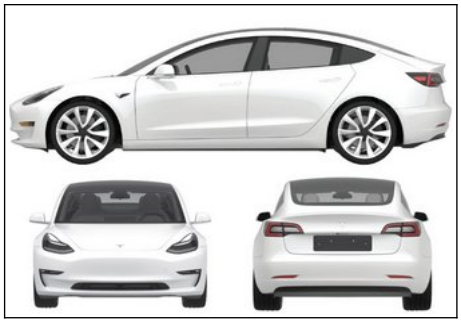


Figure 16 : Tesla Model 3 *(photo du dossier d'homologation Tesla)*

La propulsion du véhicule est assurée par un moteur unique de puissance nette 239 kW placé sur l'essieu arrière alimenté par une batterie haute tension d'environ 400 volts placée entre les deux essieux sous les sièges. Une batterie basse tension de 12 volts assure le fonctionnement des autres équipements électriques. La vitesse maximale enregistrée sur le document d'homologation est de 225 km/h.

Au niveau des équipements de sécurité passive, le véhicule disposait, en particulier, 1) d'airbags frontaux, 2) d'airbags latéraux montés sur les sièges avant, et 3) de rideaux gonflables dont l'objectif est de protéger la tête.

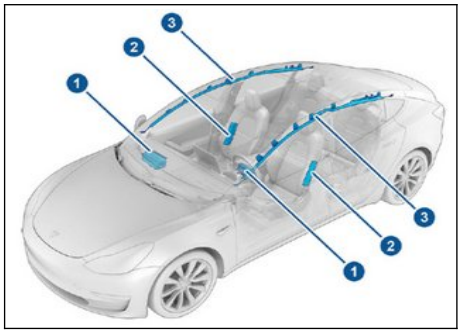


Figure 17 : positionnement des airbags *(photo manuel du conducteur Tesla)*

Les coussins de ces systèmes se gonflent lorsque les capteurs associés détectent une valeur de décélération due à l'impact supérieure au seuil de déploiement enregistré. Toutefois, le manuel du conducteur rappelle que suivant les conditions de l'impact, ces systèmes de protection peuvent ne pas s'activer. Ainsi les airbags frontaux ne pourront se déployer en cas de collision latérale, en cas de collision arrière par un autre véhicule, ou lors d'un retournement. Il en est de même pour les airbags latéraux dans le cas de chocs frontaux.

Au vu de la vitesse au moment des chocs en fin d'accélération et des dégâts consécutifs contre le mobilier urbain et les véhicules, on peut souligner l'efficacité de tels équipements qui ont grandement participé à la protection des personnes transportées.

Cet équipement d'airbags dispose également d'un système qui enregistre quelques paramètres cinématiques du véhicule au moment d'un choc, appelé EDR (Event Data Recorder). Les données correspondantes ont pu être extraites et sont présentées dans les paragraphes suivants.

Le véhicule disposait également d'un système spécifique d'enregistrement des données échangées entre les différents capteurs et calculateurs qui équipent le véhicule. Comme le précise le manuel de l'utilisateur, certaines données cinématiques et de fonctionnement des équipements sont stockées par le véhicule et peuvent être consultées à distance par l'intermédiaire du système de transmission sans fil présent à bord. Ces données sont utilisées en particulier par les techniciens de service Tesla lors de l'entretien du véhicule. Ce système de transmission permet également à Tesla de disposer, périodiquement, de données particulières pour évaluer les performances de conduite du véhicule et mettre à jour les logiciels embarqués.

Enregistrées dans un fichier appelé « log », correspondant au journal de bord, ces différentes données sont horodatées suivant des fréquences fixées par Tesla. Pour les données cinématiques de type continu, la fréquence est généralement d'un enregistrement toutes les secondes. Pour des évènements de type discret, comme un appui sur la pédale de frein ou l'activation de l'AEBS, l'enregistrement est réalisé à chaque changement d'état. De plus, certaines valeurs sont issues directement d'un ou de plusieurs capteurs, d'autres sont calculées, comme c'est le cas pour la vitesse du véhicule qui est obtenue à partir de la vitesse mesurée de la rotation de chaque roue.

Sur le plan de la conduite, le véhicule s'apparente à un véhicule à boîte de vitesses automatique. Deux pédales sont donc présentes, d'accélération et de freinage, espacées d'un peu plus de 6 cm de bord à bord et décalées dans un plan vertical d'environ 5 cm, la pédale de frein étant la plus haute. La pédale d'accélérateur a un déplacement angulaire maximal proche de 13° et celle de frein de 22° par rapport à leur position de repos.

Le support de la pédale d'accélérateur est allongé et étroit, alors que celui de la pédale du frein est large et légèrement moins haut. Ces différences liées à la silhouette sont importantes, car elles doivent permettent au conducteur de distinguer ou de contrôler, de manière non visuelle et par sa capacité de proprioception, qu'il appuie sur la bonne pédale.

Figure 18 : pédales d'accélérateur et de frein du véhicule accidenté
(source : IRCGN, photo légendée BEA-TT)

Bien que la pédale de frein soit plus relevée que celle de l'accélérateur, elle s'enfoncera plus que cette dernière d'environ 5 cm. À l'inverse, enfoncer la pédale d'accélérateur à son maximum amène celle-ci à s'écarter de la position de repos de la pédale de frein d'environ 10 cm.

Chaque pédale dispose de capteurs transmettant des données aux différents systèmes de commande.

Une pression sur la **pédale de frein** va, par l'intermédiaire du levier de celle-ci et d'une tige, dite « Switch-flag », qui lui est soudée, activer le capteur associé et enclencher l'allumage des feux stop. La donnée correspondante du fichier log est appelée « VCLEFT_Brake Switch Pressed Brake Switch Status ». Elle est discrète et de valeur 0 « Switch not pressed » s'il n'y a pas d'appui sur la pédale de frein, ou 1 « Switch pressed » dans le cas contraire.

Concernant l'**accélérateur**, deux capteurs de position inductifs, appelés A et B, mesurent chacun l'angle correspondant à un appui sur l'accélérateur. Les données transmises par ces capteurs sont des tensions dont l'une est le double de l'autre. Les courbes de tension correspondantes sont linéaires.

Les valeurs de sortie de ces capteurs sont proportionnelles à leur tension d'alimentation, et lorsque la pédale de l'accélérateur n'est pas enfoncée, elles ne sont pas nulles.

Comme indiqué par Tesla, la tension des capteurs au niveau de la pédale d'accélérateur, de valeur analogique, est transformée en données numériques par l'intermédiaire d'un convertisseur. Les valeurs obtenues de chacun sont comparées entre elles pour savoir s'il n'y a pas d'incohérence entre les mesures, puis sont traitées.

La valeur calculée qui en découle est traduite en pourcentage par rapport à la course totale de l'accélérateur. Appelée « DI_accelPedalPos », elle est enregistrée toutes les secondes et sur évènement particulier, tel que l'activation de l'AEBS. Cette donnée est par la suite utilisée pour définir le couple moteur associé.

Deux autres valeurs en lien avec l'accélérateur sont enregistrées, intitulées « PM_pedalPosMaxA » et «PM_pedalPosMaxB ». Pour Tesla, comme la position réelle de la pédale d'accélérateur peut changer rapidement pendant une seconde (la période d'échantillonnage), le paramètre « DI_accelPedalPos » peut ne pas être en mesure de refléter toutes les positions réelles de la pédale. Le signal PM_pedalPosMaxA contient la valeur maximale enregistrée de la position de la pédale d'accélérateur du capteur A pour la dernière période d'échantillonnage d'une seconde. Tesla a précisé que ces valeurs sont traitées par un deuxième processeur redondant de sécurité.

Pour mettre en mouvement le véhicule, un levier de vitesse au niveau du volant permet de sélectionner la marche avant (Drive) en tirant le levier vers le bas, la marche arrière (Reward) en poussant le levier vers le haut. En cas d'arrêt pour un stationnement, le point mort (Neutral) en position médiane doit être sélectionné, et le frein associé (Park) enclenché en appuyant sur le bouton positionné au bout du levier.

Figure 19 : levier de vitesse
(source : manuel du conducteur Tesla)

Ce levier de vitesse sert également à activer le régulateur de vitesse dynamique, en le tirant à son maximum vers le bas au-delà de la position (D), et par un doublement rapide de cette action amène la fonction d'assistance au maintien de cap à s'activer en plus du régulateur de vitesse dynamique. Ces fonctions d'aide à la conduite sont désactivées, entre autres manœuvres, par un appui sur la pédale de frein ou un relèvement du levier de vitesse.

Le manuel du conducteur, qui prend comme référence logiciel la version 2022.24.5, alerte en particulier que « dans les situations d'urgence, si les freins ne fonctionnent pas correctement, il faut maintenir le bouton de mise en stationnement (P) enfoncé pour amener le véhicule à l'arrêt ». Parmi les situations d'urgence qui peuvent amener le conducteur à user de cette procédure, est la perte de liquide de frein, qui sera signalée par un voyant sur le panneau de contrôle.

Conformément aux spécifications des documents techniques de la réglementation internationale en lien avec l'homologation des véhicules, le frein de stationnement permet de maintenir le véhicule immobile sur une déclivité ascendante ou descendante de 20 %, et l'actionnement seul de ce système arrête le véhicule sur une distance de 15 m, à partir d'une vitesse initiale de 30 km/h, avec une valeur de décélération de −2,3 m/s². Cette valeur apparaît supérieure au seuil réglementaire de −1,5 m/s².

3.3.2 - Freinage à récupération

Comme tous les véhicules à propulsion électrique, la voiture Tesla Model 3 accidentée disposait d'un système de récupération d'énergie qui s'active automatiquement au moment où le véhicule décélère. Pendant ces phases, le moteur de propulsion n'étant plus alimenté, il continue néanmoins de tourner du fait du déplacement du véhicule et agit alors en tant que générateur de courant, suivant le principe d'une dynamo. Ainsi, une partie de l'énergie cinétique du véhicule est convertie en énergie électrique, permettant de réalimenter la batterie de propulsion. Ce principe s'apparente au frein moteur d'un véhicule à propulsion thermique mais la décélération créée sur un véhicule électrique est plus élevée, car les constructeurs recherchent à maximiser l'énergie électrique de réalimentation, et donc l'autonomie du véhicule, au travers de ce freinage dit « à récupération ».

Le freinage à récupération de catégorie A[2], qui équipait le véhicule Tesla au vu des documents d'homologation, ne fait pas partie, par définition, du système de freinage de service. Une prescription réglementaire supplémentaire indique que dans ce cas, le freinage électrique à récupération doit être actionné uniquement par la commande d'accélérateur et/ou la position point mort du levier de vitesse. D'autres véhicules peuvent avoir le freinage à récupération associé à la pédale de frein, qui est alors de catégorie B.

Pour rappel, trois systèmes de freinage équipent tout véhicule : le système de freinage de service, qui doit permettre de contrôler le mouvement du véhicule et de l'arrêter d'une façon sûre, rapide et efficace, quels que soient la vitesse et l'état de charge et quelle que soit la déclivité ascendante ou descendante sur laquelle le véhicule se trouve ; le système de freinage de secours qui, en cas de défaillance du précédent, doit pouvoir arrêter le véhicule sur une distance raisonnable, en utilisant les mêmes équipements que ceux du système de freinage de service ; et le système de freinage de stationnement.

Ce freinage à récupération de catégorie A ralentit le véhicule Model 3 chaque fois que la position de la pédale d'accélérateur est en dessous d'un certain seuil qui dépend de la vitesse du véhicule. Il n'est pas nécessaire de la relâcher totalement.

2 Voir le règlement UNECE n° 13-H relatif au système de freinage des voitures particulières

Pour des vitesses supérieures à 30 km/h, ce seuil, point d'inflexion entre accélération et freinage à récupération, reste fixe à une valeur d'enfoncement d'environ 20 %.

En dessous d'une vitesse de 30 km/h, ce seuil-point d'inflexion diminue. Pour une vitesse de 15 km/h, la pédale d'accélérateur ne doit pas être enfoncée de plus de 10 % pour obtenir une décélération. Lorsque la voiture est à l'arrêt, sa vitesse étant égale à 0, ce seuil-point d'inflexion a logiquement une valeur nulle. La plage de valeurs de ce seuil-point d'inflexion varie donc entre 0 % et à peu près 20 %.

On peut constater d'après les données fournies par Tesla qu'au démarrage, ou à une vitesse de circulation faible, le couple moteur maximal (3 000 Nm) est disponible dès un enfoncement de l'accélérateur proche de 80 %. Cette caractéristique des moteurs électriques permet de disposer d'accélérations importantes et maximales même si le véhicule est initialement à l'arrêt, à la différence d'un véhicule à propulsion thermique.

Lorsque la vitesse est suffisamment faible, et sans une action sur la pédale de frein, trois modes de conduite et d'arrêt peuvent être sélectionnés par le conducteur. Pour le véhicule accidenté, le mode « Hold » (Serrage) était programmé. Les réglages associés permettent d'arrêter le véhicule par actionnement automatique des freins une fois que la vitesse est proche de la valeur nulle. À titre de comparaison, dans le mode « Roll » (Roulement) le moteur continue d'appliquer un couple, ce qui fait avancer le véhicule lentement, comme pour un véhicule à transmission automatique traditionnel. Dans le troisième mode, dit « Creep » (Rampement), aucun freinage ni aucun couple moteur n'est appliqué, le véhicule continue dans ce cas sur son erre.

3.3.3 - Les aides à la conduite équipant le véhicule

Dans le paragraphe du certificat de conformité européen relatif aux caractéristiques générales de construction, en regard de la question « *le véhicule est-il non-automatisé, automatisé, totalement automatisé ?* », il est indiqué non-automatisé.

Le règlement UE 2019/2144 relatif aux prescriptions applicables à la réception par type des véhicules à moteur et de leurs remorques, ainsi que des systèmes, composants et entités techniques distinctes destinés à ces véhicules, définit le « véhicule automatisé » comme étant un véhicule à moteur conçu et construit pour se déplacer de façon autonome pendant certaines périodes de temps, sans supervision continue de la part du conducteur, mais pour lequel l'intervention du conducteur demeure attendue ou requise, et le « véhicule entièrement automatisé » comme étant un véhicule à moteur qui a été conçu et construit pour se déplacer de façon autonome sans aucune supervision de la part d'un conducteur.

Le Code de la route apporte quelques précisions. L'article R311-1-1 définit le système de conduite automatisé comme étant un système associant des éléments matériels et logiciels, permettant d'exercer le contrôle dynamique d'un véhicule de façon prolongée.

Le contrôle dynamique correspond à l'exécution de toutes les fonctions opérationnelles et tactiques en temps réel nécessaires au déplacement du véhicule. Il s'agit notamment du contrôle du déplacement latéral et longitudinal du véhicule, de la surveillance de l'environnement routier, des réactions aux événements survenant dans la circulation routière et de la préparation et du signalement des manœuvres.

Par déduction, le véhicule non automatisé est un véhicule qui n'est ni automatisé ni totalement automatisé. De ce fait, le conducteur reste en permanence responsable de la conduite du véhicule, même si celui-ci dispose d'un grand nombre d'équipements dans le

but de l'aider dans sa conduite (ADAS[3]). Ces systèmes soit informent ou alertent le conducteur, donc sans action sur les gouvernes du véhicule, soit exécutent certaines tâches de conduite à sa place, en agissant sur la direction, ou sur les systèmes de freinage ou d'accélération. Le conducteur doit en permanence surveiller l'environnement, surveiller le fonctionnement des ADAS et être prêt à réagir en cas d'évènement, de danger ou de dysfonctionnement. Leur fonctionnement repose sur des capteurs électromagnétiques, en particulier radar, inductif ou à ultrasons, et optique comme les caméras.

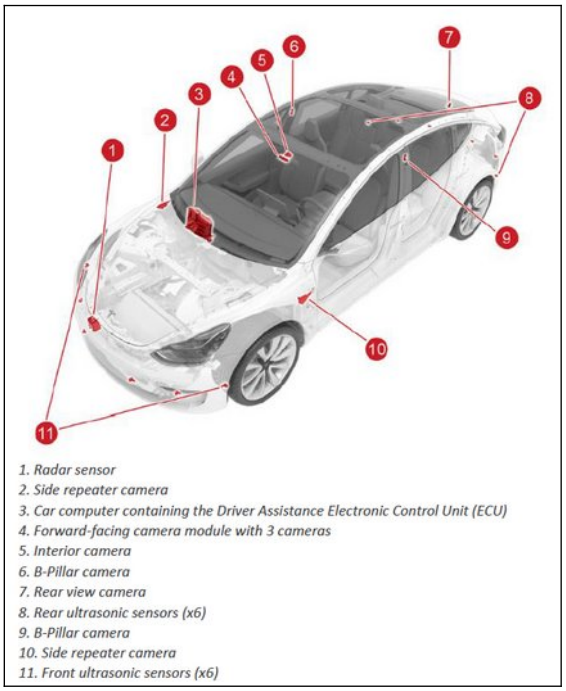


Figure 20 : véhicule Tesla et positionnement des capteurs *(source Tesla)*

Le véhicule impliqué dans l'accident était équipé des aides suivantes.

3.3.3.1 - Anti-lock Brake System ABS

Ce système ajuste la pression de freinage maximale transmise à chaque roue afin d'éviter la perte de tenue de route qui pourrait être causée par le blocage de l'une d'entre elles. Ce système est activé par défaut.

3.3.3.2 - IBooster

D'après Bosch concepteur de l'iBooster, l'actionnement de la pédale de frein pousse la tige qui lui est solidaire dans un mouvement de translation. La force exercée sur cette tige ainsi que son déplacement, détectés par des capteurs internes, sont traduits en commande à un moteur électrique. Celui-ci va entraîner les roues dentées à la rotation et par l'intermédiaire d'une vis sans fin transforme ce mouvement rotatif en translation supplémentaire pour accompagner ou renforcer celui créé par l'appui sur la pédale de frein. La force totale fournie par l'iBooster et par le pied du conducteur est convertie en pression hydraulique dans un maître-cylindre standard contenant le liquide de frein.

3 ADAS : Advanced Driver Assistance Systems

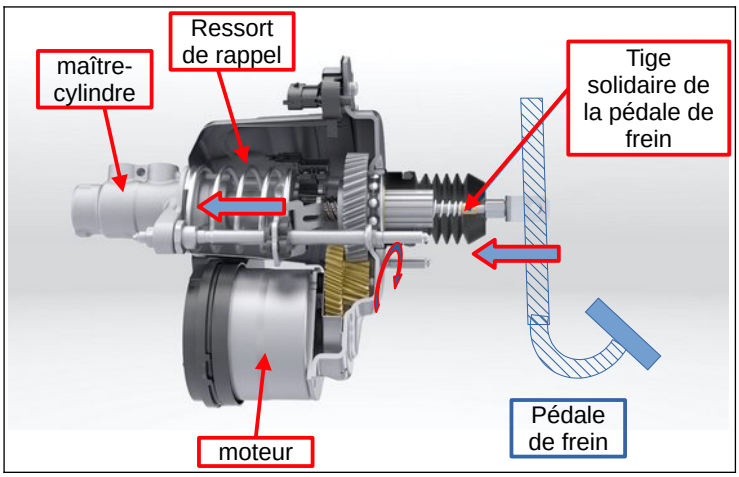


Figure 21 : IBooster *(source Bosch, légendée BEA-TT)*

Tesla précise que si l'iBooster n'est plus alimenté électriquement, le moteur ne fournissant plus d'aide dans ce cas, le conducteur peut toujours freiner. Ceci est confirmé par Bosch[4].

Dès lors, sans l'aide du moteur électrique, la force à exercer sur la pédale de frein devra être supérieure pour vaincre la résistance du ressort de rappel car conformément au règlement UNECE n° 13-H, le fait qu'il ne fonctionne pas ne doit pas empêcher la fraction du système de freinage de service qui n'est pas affectée par la défaillance de pouvoir arrêter le véhicule dans les conditions requises pour le freinage de secours.

Les tests d'homologation du modèle de la Tesla indiquent dans les documents relatifs à la vérification du règlement n° 13H que l'appui sur la pédale nécessite une force d'environ 390 N avec l'IBooster et environ 480 N sans ce système pour une vitesse de 100 km/h. D'autres protocoles d'essai sont prévus avec des conditions différentes de vitesse, de coefficient de frottement de la chaussée et de charge du véhicule, mais les résultats obtenus pour le véhicule accidenté restent proches de ces valeurs, qui restent en dessous du seuil imposé par la réglementation de 500 N.

Aux questions du BEA-TT, Tesla a répondu qu'en cas de défaillance de l'iBooster, une alerte concernant cet équipement aurait été enregistrée dans le fichier log, et un signal de panne aurait été affiché sur le panneau de commande par le symbole

Le règlement UNECE n° 13-H impose que le signal d'avertissement doit rester allumé aussi longtemps que le défaut ou la défaillance persiste et que le contact est mis, et qu'il doit être constant et non pas clignotant.

Aucune alerte de ce type ne figure dans le fichier log ou n'a été signalée par le conducteur dans son témoignage comme étant apparue sur le panneau de commande.

Deux capteurs internes transmettent des informations sur l'activation des freins, l'un en lien avec un appui sur la pédale de frein appelé « IBST_driverBrakeApply » et l'autre qui mesure l'enfoncement de la tige solidaire de la pédale de frein en millimètres appelé « IBST_sInputRodDriver ».

4 https://www.gm-volt.com/attachments/ibooster_292000p12j_en_low-pdf.123625/

3.3.3.3 - Electronic Stability Programm (ESP)

Ce système est un élément important de la sécurité du véhicule et d'après Tesla fait partie intégrante du système de freinage. L'ESP calcule la trajectoire prévue du véhicule en fonction des données d'entrées fournies par les actions du conducteur (vitesse, angle de braquage…) et la compare 25 fois par seconde[5] au comportement du véhicule à partir des données de différents accéléromètres et de la vitesse de rotation de chaque roue. En particulier tout événement de sous-virage ou de survirage va entraîner une action de l'ESP sur les freins pour stabiliser le véhicule. Toutefois ce système reste une aide à la conduite et ne peut pallier les pertes de contrôle dues à des mouvements trop brusques.

L'ESP commande ainsi le système de freinage avec ou sans action du conducteur sur celui-ci. En particulier, lorsque l'IBooster a un fonctionnement défectueux, l'ESP peut fournir une pression complémentaire pour aider au freinage engagé par le conducteur. Dans ce cas, Tesla indique que des pulsations apparaissent au niveau de la pédale de frein ainsi qu'un bruit de pompage. Il s'agit du mode de fonctionnement de secours sûr, prévu, qui permet d'obtenir une décélération du véhicule beaucoup plus importante que par la seule énergie musculaire du conducteur. **Le témoignage du conducteur accidenté ne fait pas état d'un tel type de fonctionnement mais d'une pédale dure.**

Ce système est activé par défaut. Un capteur interne appelé « ESP_brakeMasterCylPress » mesure la pression du circuit de liquide de frein hydraulique.

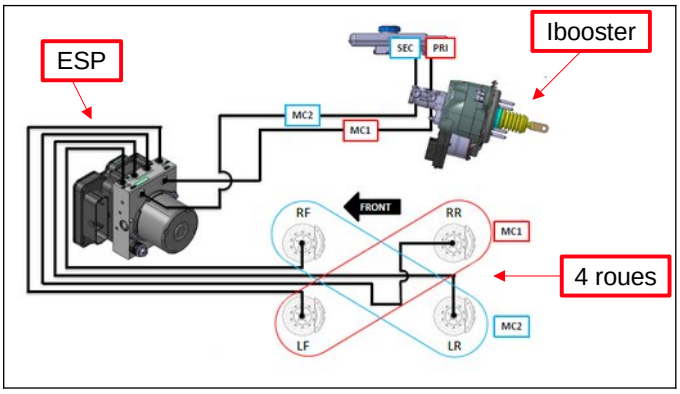


Figure 22 : circuit de freinage entre Ibooster et ESP
(source RDW, documents fournis par Tesla pour l'homologation, légendée BEA-TT)

3.3.3.4 - Traction Control (TC)

Ce système antipatinage surveille en permanence la vitesse des roues avant et arrière, et si une perte de traction est détectée par l'analyse des capteurs de vitesse de roue, le système minimise le patinage des roues en contrôlant la pression de freinage et le couple moteur. Ce système est activé par défaut.

3.3.3.5 - Traffic-Aware Cruise Control (TACC)

Ce système est le régulateur de vitesse adaptatif. Il maintient une vitesse de conduite définie, en agissant sur la propulsion, de la même manière que le régulateur de vitesse standard, mais peut également ajuster la vitesse du véhicule en fonction de la distance par rapport aux autres véhicules dans la même voie ou dans la voie adjacente.

Le manuel de l'utilisateur indique que si un véhicule est détecté dans la même voie circulant à une vitesse plus faible, le régulateur de vitesse dynamique est conçu pour

5 https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/driving-safety/electronic-stability-program/

ralentir le véhicule Tesla de manière à maintenir une interdistance constante. Dans ce cas, un léger mouvement de la pédale de frein peut être constaté. En revanche, lorsque le régulateur de vitesse dynamique accélère le véhicule, la pédale d'accélérateur ne bouge pas.

Le conducteur peut dépasser cette limite par un appui sur la pédale d'accélérateur. Au relâchement de cette pédale, le régulateur de vitesse dynamique reprend la conduite et adapte la vitesse du véhicule à la vitesse enregistrée.

Ce régulateur est activé en tirant une fois vers le bas le levier de vitesses lorsque le véhicule est en mouvement. Si la limite de vitesse de la zone de circulation du véhicule est identifiée, par exemple par lecture des panneaux de signalisation de vitesse maximale autorisée ou d'entrée de ville, ou par référence aux données cartographiques fournies par le GPS lorsque celles-ci l'intègrent, elle sera affichée sur l'interface utilisateur.

La vitesse de croisière sera la vitesse la plus élevée entre celle enregistrée manuellement ou identifiée, et la vitesse de conduite. Cette fonctionnalité peut être active pour une plage étendue de vitesse allant de 8 km/h à 150 km/h et est désactivée lorsque le conducteur appuie sur la pédale de frein ou pousse le levier d'activation vers le haut.

Le régulateur de vitesse, une fois actif, ne se désactive pas même lorsque le véhicule qui précède s'arrête, entraînant également l'arrêt du véhicule Tesla. Lorsque le véhicule suivi repart, le régulateur de vitesse dynamique actionne la propulsion du véhicule Tesla à une vitesse cohérente avec celle du véhicule qui le précède, et si aucun véhicule n'est détecté, à la vitesse prédéfinie, avec l'accélération maximale.

Ce système peut se trouver dans différents états d'activation et de fonctionnement, mesuré par le paramètre « DI_cruiseState ».

3.3.3.6 - Autosteer

Ce système fonctionne de pair avec le régulateur de vitesse dynamique pour maintenir la Model 3 dans sa voie de circulation, en ramenant le véhicule vers le centre par une action sur la direction, à partir des informations fournies par les caméras, utilisées en particulier pour reconnaître les marquages de voie afin de centrer le véhicule, par le radar, les ultrasons ainsi que le GPS pour l'identification du type de route.

Si des obstacles tels que des garde-corps sont détectés d'un côté, le guidage automatique décalera le véhicule dans la voie pour augmenter l'espace libre de ce côté.

Pour activer l'Autosteer, le conducteur tire le levier de vitesses à droite du volant vers le bas deux fois rapidement (moins d'une seconde) lorsque le véhicule est en mouvement.

Cette fonctionnalité cesse lorsque le conducteur manœuvre le volant, appuie sur la pédale de frein ou pousse le levier d'activation vers le haut.

Un avertissement du manuel de l'utilisateur souligne que de nombreuses circonstances imprévues peuvent entraver le fonctionnement de ce système, et par voie de conséquence contribuer à diriger le véhicule de manière inappropriée.

3.3.3.7 - Automatic emergency breaking system (AEBS)

Le règlement n° 152 UNECE définit ce système comme étant un système actif de freinage d'urgence capable de détecter automatiquement le risque d'une collision par l'avant imminente et d'activer le système de freinage du véhicule afin d'en réduire la vitesse pour éviter la collision ou en diminuer la gravité.

Un avertissement est émis à l'intention du conducteur avant l'activation automatique du freinage.

Pendant le fonctionnement du système, le conducteur doit pouvoir reprendre le contrôle du véhicule à tout moment par une action consciente, notamment en changeant de trajectoire ou en rétrogradant.

Le système doit être conçu de façon à réduire au minimum l'émission des signaux d'avertissement et à éviter d'entraîner un freinage d'urgence dans les situations où il n'y a pas de risque de collision imminente.

Trois types de scénarios sont prévus pour tester le fonctionnement du système, en utilisant des cibles avec des caractéristiques définies représentant une voiture, un piéton et un cycliste. Le signal d'avertissement de risque de collision doit être produit dans au moins deux des modes suivants : sonore, haptique ou visuel.

Ce signal doit pouvoir être émis avant l'activation du freinage, Toutefois, si le risque de collision ne peut pas être détecté à temps pour l'émission d'un avertissement, celui-ci doit être produit au plus tard au début du freinage d'urgence, et peut être interrompu si le risque de collision a disparu.

Tesla précise que le système du véhicule impliqué surveille la zone devant lui et « détecte les objets tels qu'un véhicule, une moto, un vélo ou un piéton ». Si une collision est jugée probable compte tenu de la trajectoire suivie, l'avertissement sonore et visuel signifie pour le conducteur la consigne d'une intervention immédiate pour l'éviter. Pour Tesla, il convient de noter que ces indications ne peuvent pas être considérées comme des limites absolues. Elles doivent en effet simplement être considérées comme des indications de la performance globale de l'activation du système AEBS mesurée sur la position du véhicule par rapport à la position latérale et longitudinale des objets détectés, telle que mesurée lors d'activations réelles sur des cyclistes dans des conditions réelles et sur des pistes d'essai.

À défaut d'action du conducteur après l'émission, et si la collision est considérée comme inévitable, le freinage d'urgence automatique peut actionner les freins « afin de réduire la vitesse du véhicule et donc la gravité de l'impact ».

En avertissement dans le manuel de l'utilisateur, il est précisé que « le freinage d'urgence automatique est conçu pour réduire la gravité d'un impact. Il n'est pas conçu pour éviter une collision ». Cette fonctionnalité fonctionne pour des vitesses comprises entre 5 km/h et 150 km/h. En dessous d'une vitesse de 50 km/h, il est précisé que l'activation de l'AEBS est telle que le véhicule s'arrêtera.

Si le conducteur souhaite reprendre le contrôle du véhicule, il peut agir, pour désactiver l'action de l'AEBS, soit sur le volant, soit sur l'accélérateur ou sur la pédale de frein. Sur la direction, la vitesse de braquage doit être supérieure à 200°/s, ou l'angle du volant doit atteindre une valeur supérieure de 50° par rapport à l'angle au moment du déclenchement de l'AEBS. Pour l'accélérateur, un enfoncement de la pédale doit atteindre une valeur de plus de 90 %, ou une valeur de plus de 50 % par rapport à la valeur au moment de l'activation de l'AEBS. Concernant la pédale de frein, celle-ci doit être relâchée 0,5 s ou plus après le déclenchement du système de freinage d'urgence automatique.

Sur le plan réglementaire, les spécifications imposent que ce système doit éviter ou réduire l'impact d'un choc avec l'arrière d'une voiture particulière située dans la même voie, et éviter ou réduire l'impact d'un choc contre un piéton.

Comme le rappelle le paragraphe introductif du règlement, les conditions de circulation et les particularités des infrastructures ne peuvent pas toutes être prises en compte pour

l'homologation de ce système AEB. Il est reconnu que l'efficacité requise ne peut pas être obtenue dans toutes les circonstances (l'état du véhicule, l'adhérence à la route, les conditions atmosphériques, les infrastructures routières dégradées et les scénarios de trafic peuvent affecter le fonctionnement du système).

A contrario, les circonstances et les aléas de la vie réelle ne doivent pas donner lieu à des avertissements intempestifs au point d'inciter le conducteur à désactiver le système.

Dans un scénario voiture contre voiture, le système doit être fonctionnel au moins pour des vitesses du véhicule équipé comprises entre 10 km/h et 60 km/h et pour toutes les conditions de charge du véhicule.

La plage de vitesse peut paraître réduite, mais elle correspond au principal cas d'usage indiqué en introduction du règlement, à savoir les véhicules de type M1 et N1[6] principalement utilisés en conduite urbaine. Il est d'ailleurs précisé que l'AEBS doit être capable d'empêcher un choc pour des vitesses du véhicule équipé inférieures à 40 km/h, et de réduire la vitesse d'impact d'environ 25 km/h dans la plage de vitesse comprise entre 40 km/h et 60 km/h.

Dans un scénario voiture contre piéton, le système doit être fonctionnel pour des vitesses similaires, c'est-à-dire être capable d'empêcher un choc pour des vitesses du véhicule équipé inférieures à 30 km/h pour un piéton traversant la rue, et de réduire la vitesse d'impact de 15 km/h dans la plage de vitesse comprise entre 30 km/h et 60 km/h.

La procédure d'essai pour homologuer le véhicule apporte quelques éléments supplémentaires sur les conditions de fonctionnement de l'AEBS. En particulier, les axes longitudinaux des véhicules dans le premier scénario ne doivent pas être distants de plus de 0,2 m. Dans le cas de l'essai dans le cadre du deuxième scénario, la cible-piéton au moment du freinage ou du choc ne doit pas être à plus de 0,1 m de l'axe du véhicule.

Ainsi, le domaine réglementaire de fonctionnement de l'AEBS est limité aux véhicules circulant dans le même sens, dans la même voie, et alignés voire très légèrement désaxés.

Certes, le constructeur peut concevoir un système dont les performances dépassent les seuils minimaux fixés par la réglementation. C'est ce qu'indique le manuel du conducteur puisque ce système fonctionne pour des vitesses comprises entre 5 km/h et 150 km/h. Cependant, aucune autre limite précise n'est spécifiée, telle que la distance longitudinale et latérale de détection ou le taux de détection par type d'obstacle ou de véhicule.

En revanche, Tesla met en avant certaines « limites et inexactitudes » qualitatives liées au fonctionnement des équipements qui peuvent ne pas toujours détecter les obstacles, véhicules, vélos ou piétons, si la route est sinueuse, la visibilité réduite par les conditions météorologiques (pluie, brouillard), ou les capteurs obstrués (saleté, condensation). Cette liste n'est pas exhaustive.

Le manuel de l'utilisateur précise également que si un défaut est détecté pour une des fonctionnalités du système d'assistance anticollision, une alerte est émise. Plus généralement, il est d'ailleurs indiqué que le conducteur peut parfois être confronté à des avertissements non valides, inappropriés ou inutiles. Comme indiqué ci-avant, en plus d'assurer le contrôle dynamique du véhicule, il incombe au conducteur de s'assurer du bon fonctionnement de cet ADAS et de réagir à bon escient en cas d'avertissement, y compris inexact.

6 Véhicules M1 : véhicule conçu et construit pour le transport de personnes et comportant, outre le siège du conducteur, huit places assises au maximum ; véhicules N1 : véhicule conçu et construit pour le transport de marchandises ayant un poids maximal inférieur ou égal à 3,5 tonnes

Donc la performance de ce système AEB ne peut pas être connue du conducteur. Toutefois comme le précise Tesla, il existe des mécanismes dans le véhicule qui permettent d'attirer l'attention du conducteur sur un dysfonctionnement du système, comme décrit ci-dessus. En outre, Tesla est prête à contribuer à l'élaboration de critères de test et paramétrés permettant de mesurer la performance du système AEBS dans le monde réel. Toute élaboration de tels critères devrait toutefois faire partie d'un règlement approprié ou d'un cadre institutionnel plus large, impliquant tous les fabricants desdits systèmes.

Enfin le terme « Autopilot » est le nom générique regroupant toutes les fonctions d'aide à la conduite disponibles sur le véhicule et permettant de le conduire sans action du conducteur principalement avec le régulateur de vitesse dynamique pour un guidage longitudinal, l'assistance au maintien de cap pour un guidage latéral, et l'aide à l'évitement des collisions.

3.3.4 - Performances de l'AEBS mesurées par Tesla

En réponse à une demande du BEA-TT sur les performances de l'AEBS pour la détection d'un cycliste, Tesla a indiqué que l'AEBS analyse les données fournies par des caméras et un radar, mais n'utilise pas celles des capteurs à ultrasons répartis à l'avant et à l'arrière sur le pourtour du véhicule.

Dans un premier document transmis, un diagramme représente les résultats de 2975 tests de détection de cyclistes établi sur routes ouvertes à la circulation et sur zones d'essai, en conditions nominales. L'origine est placée au centre de l'essieu arrière du véhicule, et chaque point représente la détection d'un cycliste.

On constate que la détection peut porter jusqu'à 180 m dans l'axe du véhicule et que la densité de points est très importante autour du véhicule à moins de 20 m y compris à l'arrière du fait de la présence de caméras.

Tesla, par ailleurs, apporte les précisions suivantes. Chacun des 3000 points identifiés correspond à un évènement unique de freinage automatique d'urgence (AEBS), obtenus (i) lors de tests réalisés selon le protocole EuroNCAP (cf. § 5.2.1), ou (ii) par activation du système lors de conduite sur la voie publique. En particulier pour les premiers, le véhicule et l'obstacle sont testés à différentes vitesses, distances et directions de rapprochement. Tesla indique aller au-delà des exigences réglementaires en termes de tests et de validation des performances du système AEBS.

3.3.5 - Le conducteur du véhicule léger

Le conducteur de la Tesla, âgé de 57 ans au moment de l'accident, est titulaire du permis de conduire depuis 1983. Comme tous les jours, il a exercé sa profession de taxi au cours de la journée.

Il est titulaire d'une carte professionnelle depuis le 19/10/1994 et a obtenu, depuis le 6/05/1996 l'autorisation de stationner, circuler et prendre en charge sur la voie publique. Le renouvellement de l'autorisation en lien avec le véhicule accidenté a été effectif à partir du 1/09/2021.

La consultation du fichier des taxis et des transports publics par les services de police indique que son dernier certificat médical d'aptitude à la conduite datait de fin 2014 et que la prochaine visite devait avoir lieu fin 2019. En fait, celle-ci a été réalisée le 11/01/2020 et il a été déclaré apte pour la durée de validité fixée par la réglementation, soit 5 ans. Il détenait également une attestation de formation continue de conducteur de taxi valide jusqu'au 2/02/2025.

Les dépistages d'alcool et de stupéfiants réalisés sur le conducteur après l'accident se sont révélés négatifs.

3.3.6 - Le trajet d'approche du véhicule léger

Le conducteur a déclaré être hors service au moment de l'accident et revenir du nord-ouest de Paris en début de soirée avec sa femme et ses deux filles. Ils avaient décidé avant de rejoindre leur domicile à Ris-Orangis d'aller dîner dans un restaurant dans le 13e arrondissement. Il a emprunté le périphérique et est sorti au niveau de la porte d'Ivry pour emprunter l'avenue d'Ivry.

3.4 - L'analyse des enregistrements

Différents types d'enregistrement ont été fournis au BEA-TT.

Le premier concerne les données récupérées par Tesla par l'intermédiaire du système de télétransmission du véhicule. Ces données couvrent une période de plusieurs minutes. Elles sont horodatées avec une heure de moins que l'heure locale.

Par la suite, les forces de l'ordre ont transmis au BEA-TT les vidéos des caméras extérieures du véhicule enregistrées sur la clé USB trouvée par eux dans le véhicule. Elles permettent de visionner l'environnement proche avant, arrière et de chaque côté du véhicule, lors des trajets effectués dans les heures de la journée, ainsi que les minutes et secondes précédant l'accident.

Une vidéo captée par une caméra de surveillance de la préfecture de Police a pu également être visionnée. La caméra se situe dans l'avenue d'Ivry et a filmé l'arrière du véhicule impliqué.

Enfin dans le cadre des expertises judiciaires, l'IRCGN[7] a analysé les données de certains calculateurs de bord, ainsi que les données qui ont été enregistrées au moment du déclenchement des airbags par le système EDR. Le BEA-TT a pu bénéficier de ces données et conclusions.

3.4.1 - Les données récupérées par télétransmission

On peut noter en premier lieu que pendant la durée d'enregistrement, l'état du régulateur de vitesse a été indisponible (CRS_STATE_UNAVAILABLE) ou en attente d'activation (CRS_STATE_STANDBY-Cruise control available but not controlling the vehicle). La fonctionnalité du guidage longitudinal n'a donc pas été activée par le conducteur. Il en est de même de la fonctionnalité de guidage latéral. **La conduite du véhicule était assurée uniquement par le conducteur et sans assistance de guidage.**

L'absence d'enclenchement du régulateur permet d'écarter une accélération automatique due à une activation involontaire de la part du conducteur pour atteindre une limite de vitesse préenregistrée. D'après son audition, il avait réglé la vitesse limite à 110 km/h lors de l'utilisation de son véhicule sur autoroute. Les courbes de vitesse ci-après montrent que ce seuil a été dépassé. Tesla a également indiqué aux enquêteurs du BEA-TT qu'aucune vitesse n'était pré-enregistrée dans le système.

Le paramètre « DI_parkBrakeState-Park Brake Status », représentant l'état du frein de parking, n'affiche aucune valeur, traduisant que ce système de freinage n'a pas été activé au cours de la durée d'enregistrement. Pour rappel (cf. § 3.3.1), Tesla souligne que dans

7 IRCGN : Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale

les situations d'urgence, si les freins ne fonctionnent pas correctement, le bouton de mise en stationnement positionné au bout du levier de vitesse doit être maintenu enfoncé jusqu'à l'arrêt du véhicule. D'après son témoignage, le conducteur aurait appuyé plusieurs fois sur ce bouton mais sans résultat. **Au vu de l'absence de valeurs enregistrées, on peut supposer que le frein de stationnement n'a pas été enclenché.**

Le paramètre relatif à la vitesse engagée du véhicule « DI_gear - Selected Gear » indique que la valeur « DI_GEAR_D-**Drive** » a été constante jusqu'à l'arrêt du véhicule après les chocs et que la valeur neutre « DI_GEAR_N -**Neutral**» a ensuite été enregistrée, traduisant une action sur le levier de vitesse. Ceci confirme le témoignage du conducteur.

Le dernier téléchargement par radiocommunication enregistré depuis les serveurs de Tesla vers le véhicule a eu lieu le 1er décembre 2021, soit une dizaine de jours avant l'accident. Il concernait la mise à jour de la version logicielle de 19 équipements, comprenant entre autres celles du système d'avertissement d'une collision FCW (Forward collision warning) et du système de gestion de la batterie. Tesla a indiqué d'ailleurs qu'aucune mise à jour logicielle ne peut se faire lorsque le véhicule est en mouvement.

3.4.1.1 - Courbes des vitesses

Les courbes des vitesses sont représentées sur la figure 23 sur laquelle on peut constater 3 évènements au cours de la minute précédant l'arrêt du véhicule au niveau du carrefour entre l'avenue d'Ivry et la rue de Tolbiac.

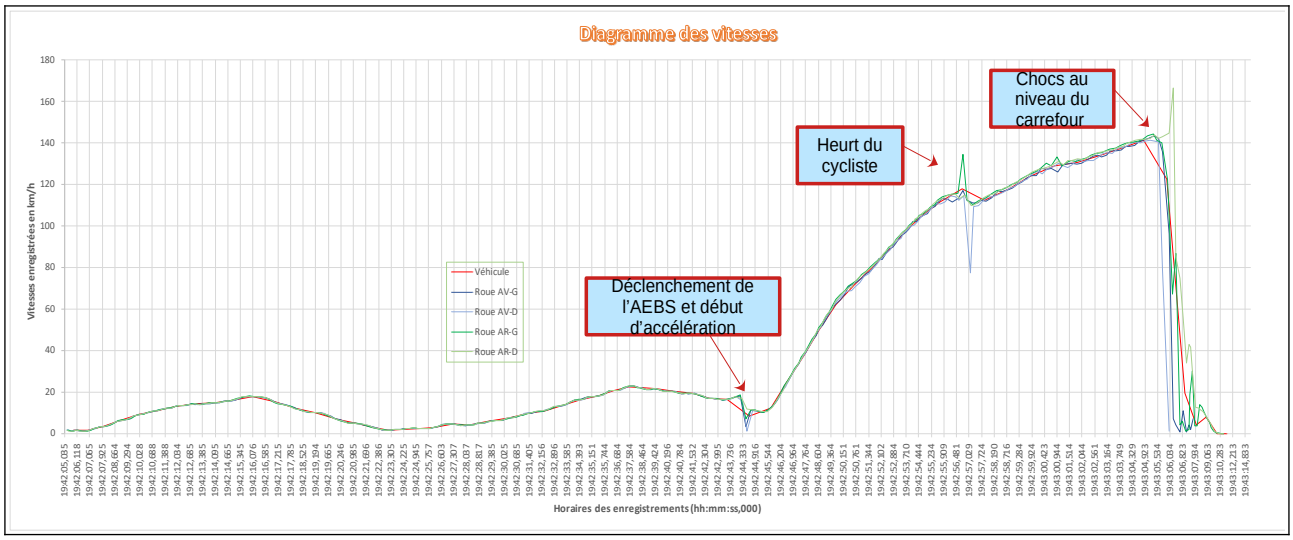


Figure 23 : courbes des vitesses des quatre roues et du véhicule

Disposant des vidéos enregistrées lors de cette période par les caméras périphériques de la voiture, on peut associer à ces évènements les images correspondantes.

3.4.1.2 - Phase de conduite sur le périphérique et au début de l'avenue d'Ivry

Chronologiquement, les vidéos enregistrées sur la clé USB pendant le parcours sur le périphérique, soit pendant la demi-heure précédant l'accident, indiquent que le véhicule circulait sur la troisième voie en partant de la droite, sans à-coups, en restant constamment dans cette voie de circulation. Le conducteur n'a pas profité des capacités d'accélération importantes de la Tesla pour engager des manœuvres de dépassement. On constate également qu'un espace, d'une longueur d'environ 4 à 6 m (longueur d'une voiture ou camionnette), était maintenu avec la voiture suivie lorsqu'elle était en mouvement. Bien que n'ayant pas de données enregistrées dans le fichier log à ce

moment, on peut néanmoins supposer que cette conduite était manuelle, sans aide du régulateur dynamique de vitesse.

Ce système n'était pas actif, comme l'a témoigné le conducteur, au moment d'engager l'avenue d'Ivry. Il n'a pas été activé par la suite.

Depuis le début de l'enregistrement des données dans le fichier log, le véhicule a circulé à des vitesses enregistrées qui fluctuent entre 1,5 km/h et 22,7 km/h.

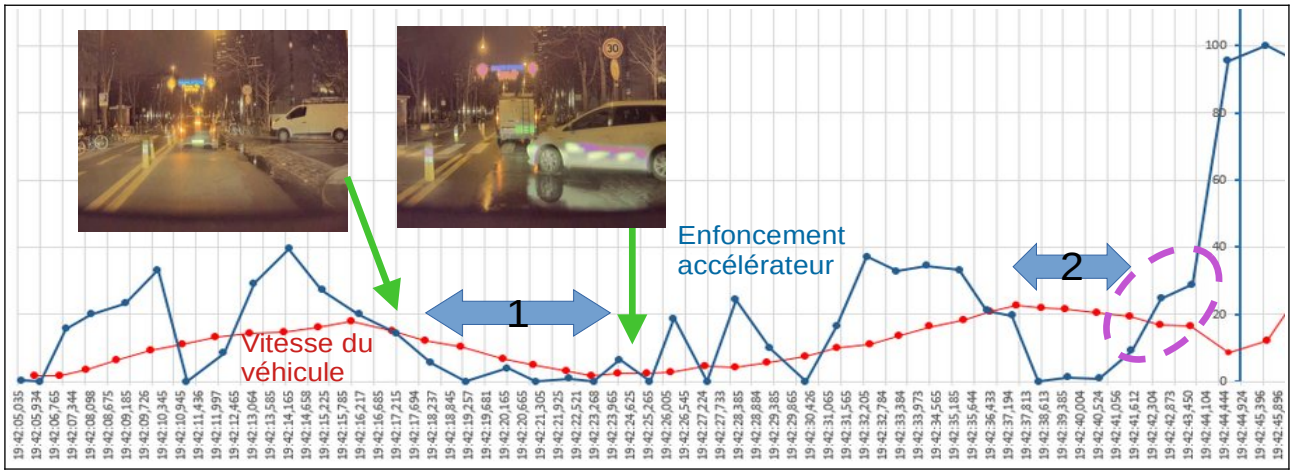


Figure 24 : courbes des vitesses et de l'enfoncement de l'accélérateur

Photo de début du freinage phase 2

Photo de fin du freinage phase 2

Figure 25 : approche des piétons

On constate que les valeurs enregistrées d'enfoncement de l'accélérateur ne dépassent pas 40 %, et que la vitesse diminue à deux endroits sur la figure 24, le premier correspondant à l'approche de l'intersection avec la rue Regnault sur la droite dont les véhicules sortant ont priorité, et le deuxième à l'approche des piétons situés à droite sur la chaussée.

Pour chacune de ces deux périodes, la pression enregistrée dans le circuit hydraulique de frein est nulle. **Le conducteur a donc utilisé le freinage à récupération associé à l'accélérateur**.

On peut supposer qu'à la fin de la phase 2 de freinage à récupération, ayant dépassé les piétons sur la droite et le véhicule précédent étant à plusieurs dizaines de mètres devant lui, le conducteur recherche à reprendre de la vitesse, et appuie légèrement sur la pédale d'accélérateur. De 10 %, puis les secondes suivantes, à 25 % puis à 30 % (zone entourée en pointillés de couleur mauve), la vitesse qui était légèrement décroissante se stabilise.

Logiquement, le véhicule devrait accélérer puisque la valeur maximale du point d'inflexion entre accélération et freinage à récupération est dépassée (cf. § 3.3.2). On constate, au contraire, que la vitesse chute brusquement. Une seconde plus tard, l'enfoncement de la pédale de l'accélérateur est alors mesuré à 95 %.

3.4.1.3 - Premier évènement, activation de l'AEBS

À la lecture du fichier log, on constate que la vitesse du véhicule enregistre un minimum de valeur 8,48 km/h au temps 19 h 42 min 44 s, soit à 20 h 42 min 44 s heure locale, consécutif aux décélérations mesurées de la vitesse des roues :

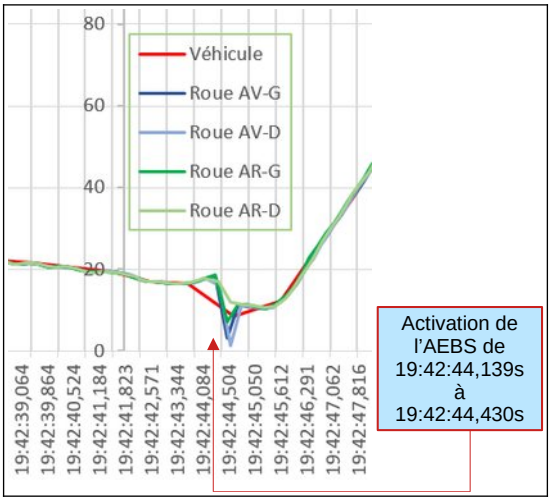


Figure 26 : activation de l'AEBS

- avant gauche, de 18,44 km/h à 3,28 km/h ;
- avant droite, de 15,96 km/h à 1,2 km/h ;
- arrière gauche, de 18,56 km/h à 7,2 km/h ;
- arrière droite, de 17,08 km/h à 12,08 km/h.

Le facteur ayant déclenché cette décélération est l'activation du freinage par l'AEBS au temps 19 h 42 min 44,139 s, qui s'arrête à 19 h 42 min 44,430 s.
Un unique avertissement de risque de collision a été émis au premier temps.

Le freinage automatique de l'AEBS a entraîné une augmentation de pression dans le circuit de freinage de 0 bar à 48,9 bars ; cette valeur est atteinte au temps 19 h 42 min 44,295 s, soit en 155 millièmes de seconde.

On constate que la pédale de frein a été enfoncée de 16 mm. On peut supposer que cet enfoncement est consécutif à l'activation de l'AEBS, et non par une action du conducteur compte tenu de la rapidité de l'augmentation de pression. En effet, il semble peu probable que le conducteur ait pu dans ce temps si court déplacer son pied de la pédale

d’accélérateur à celle du frein et appuyer sur celle-ci, à moins d’avoir le pied sur le frein pour freiner la voiture, ce qui ne correspond pas à la courbe d’enfoncement de l’accélérateur.

On note que le paramètre « VCLEFT_brake SwitchPress » , traduisant un appui sur la pédale de frein, est passé à l’état 1 de 19 h 42 min 44,242 s à 19 h 42 min 44,592 s et entraînant l’allumage des feux stop représenté sur la figure suivante.

Figure 27 : à gauche, feux stop éteints - à droite, une fraction de seconde plus tard, feux stop allumés
(source : Préfecture de Police, légendée BEA-TT)

Les images extraites de la vidéo de la caméra embarquée correspondant à ces temps montrent que les piétons immobiles sur la chaussée sont hors du champ des caméras frontale et de droite, et également du radar. Ils se trouvaient pratiquement au droit de l’avant du véhicule.

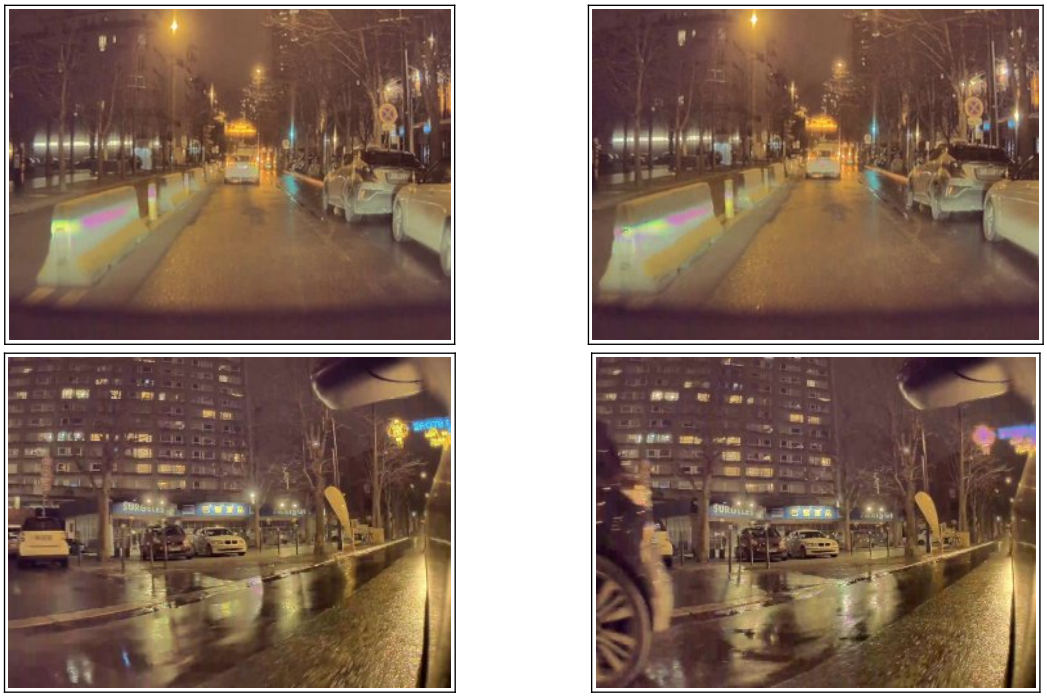


Figure 28 : à gauche, début d’allumage des feux stop - à droite, fin d’allumage des feux stop
(source : véhicule Tesla)

Il ne semble pas qu’un obstacle proche ait pu constituer un risque de collision inévitable, ayant entraîné l’avertissement et l’activation du freinage automatique d’urgence (cf. fonctionnement de l’AEBS du § 3.3.3.7), sachant que le véhicule Tesla se déplaçait à une vitesse légèrement inférieure à 20 km/h, et que la valeur de l’angle au volant enregistrée dans le fichier log est d’environ −6° sur la gauche avant l’activation de l’AEBS, et +25° sur la droite au moment du freinage automatique.

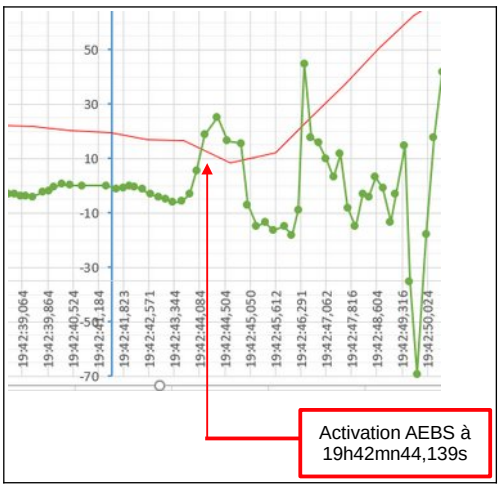


Figure 29 : en rouge vitesse du véhicule en km/h, en vert angle au volant en degrés

Pour rappel, les blocs béton séparaient les pistes cyclables de la voie empruntée par le véhicule depuis le début de l'avenue d'Ivry et aucune précédente activation de l'AEBS n'a été enregistrée, ni indiquée par le conducteur. Il est dès lors envisageable que ni ces séparateurs, ni les piétons sur la droite, ni le véhicule circulant devant à une quinzaine de mètres n'ont pu entraîner le freinage constaté. On peut émettre l'hypothèse, en faisant référence au manuel de l'utilisateur, que le conducteur a pu être confronté à un avertissement inapproprié ou inutile (cf. § 3.3.3.7) et que plusieurs facteurs ont pu affecter les performances de freinage d'urgence automatique et provoquer à tort le freinage.

Toutefois, sur ce cas et au vu des documents en possession du BEA-TT, ces facteurs restent inconnus. Rappelons néanmoins que tout système AEBS est conçu sur la base de détection par des capteurs, qui ne font que fournir une représentation schématique de ce que l'oeil humain peut voir. Dans ce cas particulier, de nombreux éléments, tels que ceux rappelés ci-après, compliquent la tâche de ces capteurs et des algorithmes de détection d'objets en termes de précision : un état de surface de la route, entraînant une multiplication de reflets lumineux ; des conditions de circulation nocturne imposant la présence importante de sources lumineuses ; des routes étroites, qui obligent les véhicules à s'approcher des véhicules en stationnement et des usagers de la route vulnérables ; les blocs de béton recouverts d'un matériau réfléchissant connu pour provoquer une distorsion du signal radar pour les véhicules utilisant un radar ; ou les piétons identifiés près de la trajectoire du véhicule léger.

Par ailleurs, comme précisé dans le paragraphe 3.3.3.7, en dessous d'une vitesse du véhicule de 50 km/h, l'AEBS restera actif jusqu'à l'arrêt de celui-ci. Au vu de la courbe des vitesses, cela n'a pas eu lieu. Une action du conducteur a donc été nécessaire pour désactiver le freinage automatique.

Ce système n'est plus actif au temps 19 h 42 min 44,430 s. D'après les informations fournies par Tesla et précisées dans le paragraphe 3.3.3.7 en lien avec une désactivation de l'AEBS suite à une action du conducteur, on peut constater à la lecture des valeurs correspondantes que ni le taux de braquage, ni la variation de l'angle du volant n'ont pu entraîner l'arrêt du freinage automatique.

En revanche, les valeurs de la position de l'accélérateur indiquent un enfoncement de la pédale de 28,8 % au temps 19 h 42 min 43,582 s avant l'activation de l'AEBS, puis de 95,6 % au temps 19 h 42 min 44,591 s et de 100 % au temps 19 h 42 min 45,602 s. Le seuil de 90 % d'enfoncement a été dépassé.

Comme précisé, l'enfoncement de l'accélérateur est concomitant à la forte réduction de vitesse.

Il est donc très probable que le conducteur avait son pied sur la pédale d'accélérateur et à aucun moment sur la pédale de frein, et l'a maintenu enfoncée à un pourcentage proche de 25 % au moment du freinage automatique dû à l'AEBS.

Par la suite, deux hypothèses sont possibles : le conducteur a enfoncé la pédale d'accélérateur jusqu'à son maximum, ou bien un problème technique a entraîné cette accélération soudaine et imprévue, telle que le décrit le conducteur dans son témoignage.

3.4.1.4 - Hypothèse d'un problème technique ayant entraîné l'accélération soudaine et imprévue

En Amérique du Nord, la NHTSA[8] a analysé un peu plus de deux cents accidents[9] survenus après ce que décrivent les conducteurs comme étant une accélération soudaine et involontaire de leur véhicule Tesla (SUA[10]). D'après cette autorité, ces accidents ont eu lieu dans des endroits et des circonstances de conduite où le freinage est attendu. 86 % de ces accidents se sont produits dans des stationnements, des allées ou d'autres endroits non fréquentés. Presque tous ces accidents ont été de courte durée, se produisant dans les trois secondes suivant le début de l'accélération soudaine et involontaire. Pour leur analyse, les données de l'EDR et du fichier log, ainsi que les vidéos, ont été utilisées. Il en ressort que les véhicules ont réagi comme prévu aux pressions sur l'accélérateur et la pédale de frein. Dans les rares cas où la pédale de frein et la pédale d'accélérateur étaient appliquées en même temps, la logique de priorité des freins fonctionnait comme prévu et réduisait le couple moteur. Les données indiquent clairement une erreur dans l'actionnement des pédales, en ce sens où la pédale d'accélérateur a été appliquée à 85 % ou plus dans 97 % des accidents examinés. Dans leur déclaration, les conducteurs indiquent que les accidents d'accélération soudaine et involontaire sont consécutifs à une erreur d'appui sur l'accélérateur alors qu'ils avaient l'intention d'appuyer sur la pédale de frein. Enfin il est noté qu'environ 51 % des accidents se sont produits au cours des six premiers mois d'utilisation du véhicule accidenté.

La NHTSA a également indiqué que le constructeur avait prévu différentes mesures pour s'assurer du bon fonctionnement des équipements. En particulier, deux capteurs redondants sont installés au niveau de l'accélérateur, utilisant de surcroît une technologie inductive sans contact. Pour éviter des défauts électriques qui pourraient avoir une incidence sur leur fonctionnement, Tesla a prévu une alimentation indépendante. Le traitement des informations est réalisé par deux processeurs dont un compare les valeurs fournies par chaque capteur et toute incohérence impose l'annulation du couple moteur.

Enfin, les tensions des capteurs converties en données numériques sont transmises au travers du réseau d'échange de données du véhicule, appelé CAN bus (Controller Area Network), pour être enregistrées dans un fichier log et dans l'EDR.

La NHTSA indique n'avoir identifié aucun défaut qui aurait pu entraîner simultanément des dysfonctionnements des systèmes de freinage et de commande du moteur. Tous les véhicules Tesla concernés sont dotés d'une logique de neutralisation des freins qui réduira le couple moteur si le frein et l'accélérateur sont appliqués en même temps.

En conclusion, constatant l'absence de preuves pour confirmer le problème d'accélération soudaine et inattendue mis en avant par les conducteurs, la NHTSA clôt son enquête en août 2021.

8 NHTSA : National Highway Traffic Safety Administration
9 https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2020/INCLA-DP20001-6158.PDF
10 SUA : Sudden unintended acceleration

En juin 2023, la NHTSA a réouvert une analyse[11] sur ces évènements d'accélération soudaine et inattendue après avoir reçu de nouveaux documents[12] explicitant les causes possibles d'un dysfonctionnement des systèmes électriques d'accélérateur. L'auteur indique que ces problèmes peuvent également concerner d'autres constructeurs que Tesla.

Une chute importante de tension au niveau du convertisseur analogique-numérique (CAN) pourrait être à l'origine d'un traitement des données erroné, malgré les précautions prises par le constructeur. L'auteur indique dans sa note que cette chute de tension pourrait être causée, par exemple, par l'activation du moteur d'assistance électrique de la direction lors de manœuvres de guidage du véhicule à faible vitesse.

Les données de sortie du convertisseur, utilisées pour le calcul de la position de la pédale d'accélérateur, pourraient alors être fortement multipliées par un coefficient supérieur à 1 et dès lors être interprétées comme une demande d'accélération importante, alors que l'enfoncement de l'accélérateur est faible. Il indique d'ailleurs que même sans appui sur cette pédale, compte tenu que la tension de sortie des capteurs est différente de la valeur 0 (cf. § 3.3.1), une accélération non souhaitée est possible.

Sans aller plus avant dans la description technique du possible phénomène décrit par l'auteur, le BEA-TT remarque que l'accélération subite et inattendue du véhicule impliqué débute au moment où le conducteur effectue une action sur le volant amenant celui-ci d'une valeur de −6° à +25 ° (cf. figure 29) alors que la vitesse est légèrement inférieure à 20 km/h. Ces circonstances semblent correspondre à l'exemple cité par l'auteur comme pouvant être une cause aux accélérations subites et inattendues, toutefois le BEA-TT ne dispose pas de données relatives à la tension d'alimentation du moteur de la direction assistée, pour en infirmer ou confirmer l'éventualité.

En revanche, les valeurs enregistrées de l'enfoncement de la pédale d'accélérateur dans le fichier log ou dans l'EDR correspondent bien aux données après traitement par le convertisseur CAN, qui d'après l'auteur, peuvent être erronées. Les valeurs des tensions analogiques des capteurs n'étant pas enregistrées, l'analyse qui ne s'en tiendrait qu'aux valeurs numériques pourrait en être faussée. L'auteur propose des solutions pour pallier ce problème de fausses valeurs enregistrées.

Le BEA-TT remarque que la NHTSA avait déjà demandé à certains constructeurs le rappel de modèles suite à des problèmes logiciels divers[13], dont des accélérations subites. Toutefois, chaque accident est particulier et il est mal venu de comparer des évènements similaires impliquant des véhicules aux équipements, logiciels et algorithmes différents.

À fin août 2024, la NHTSA n'avait pas encore publié son analyse sur cette théorie.

3.4.1.5 - Analyse des données d'accélérateur

Pour rappel, trois paramètres sont utilisés pour apporter des informations sur la position de l'accélérateur. Les valeurs du premier intitulé « DI_accelPedalPos », enregistrées toutes les secondes et sur évènement particulier tel que l'activation de l'AEBS, traduisent la position de la pédale d'accélérateur en pourcentage d'enfoncement.

Deux autres paramètres sont enregistrés, « PM_pedalPosMaxA » et «PM_pedalPosMaxB » qui représentent la valeur maximale enregistrée de la position de la pédale d'accélérateur pour la dernière période d'échantillonnage par chaque capteur.

11 https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2023/INOA-DP23002-5734.PDF
12 https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2023/INBC-DP23002-90896P.pdf
13 https://betterembsw.blogspot.com/p/potentially-deadly-automotive-software.html

Au regard des fréquences d'enregistrement de ces paramètres, on remarque que certaines valeurs sont manquantes sur des périodes plus ou moins longues. Entre 19 h 42 min 45,386 s et 19 h 43 min 10,379 s, soit pendant une période de 25 s intégrant la phase complète d'accélération ainsi que les chocs et quelques secondes après ces derniers, aucune valeur des deux paramètres de la position maximale de la pédale d'accélérateur ne figure sur le fichier log. Tesla a répondu que l'enregistrement est réalisé suivant une logique « sur changement », c'est-à-dire qu'une valeur n'est enregistrée que lorsqu'elle est différente de la précédente.

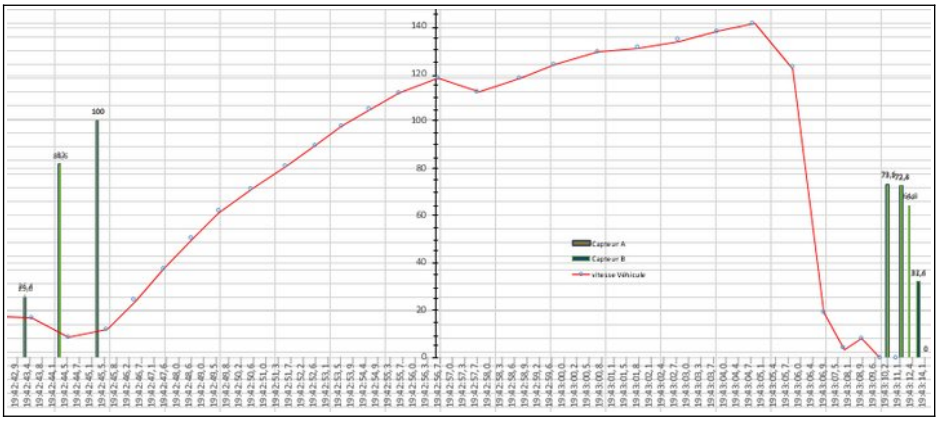


Figure 30 : données enregistrées de la valeur mesurée de l'enfoncement maximal de l'accélérateur PM_pedalPosMaxA et B

On en déduit donc, au vu de la figure 30 que les deux valeurs maximales de l'enfoncement des capteurs A et B sur chaque période d'une seconde de mesure ont atteint 100 %. Cette logique d'enregistrement peut surprendre, car une valeur qui ne figure pas sur le fichier log peut également signifier qu'il y a eu un défaut d'enregistrement. Un doute peut dès lors persister sur les positions maximales de la pédale d'accélérateur.

Concernant la valeur numérique enregistrée de la position calculée de l'accélérateur « DI_accelPedalPos », on constate également l'absence de valeurs sur les périodes entre [19 h 42 min 51,163 s - 19 h 42 min 54 930 s] et entre [19 h 42 min 57,950 s - 19 h 43 min 02,349 s], soit environ 4 s à chaque fois. Tesla a apporté la même réponse sur la logique d'enregistrement, à savoir que si la valeur mesurée est égale à la précédente, elle n'est pas enregistrée.

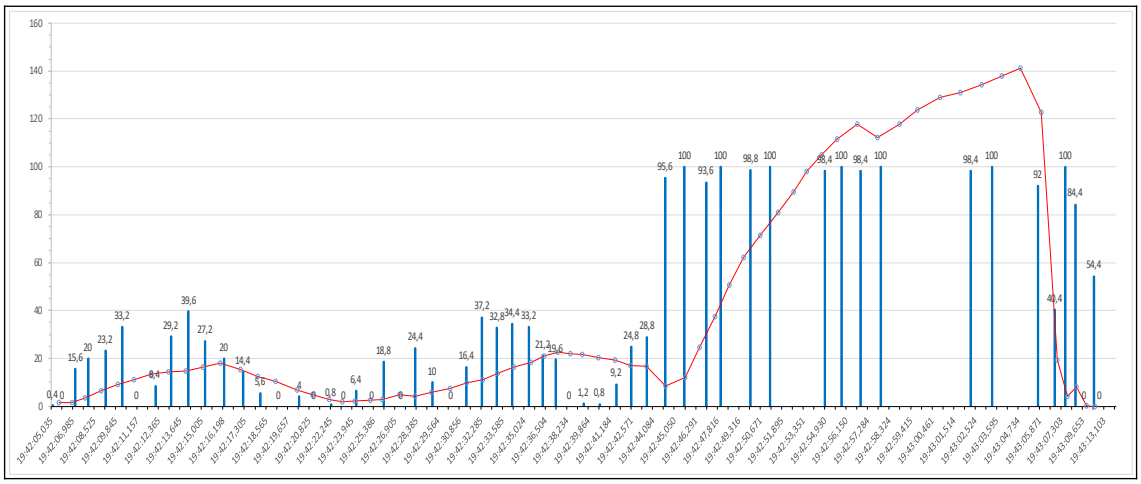


Figure 31 : données enregistrées de la valeur calculée de l'enfoncement de l'accélérateur DI_accelPedalPos (en %) et courbe de la vitesse du véhicule (en km/h)

Les figures 30 et 31 montrent donc que l'enfoncement de l'accélérateur a été maximal pendant la vingtaine de secondes après l'activation de l'AEBS, nonobstant les quelques variations. Et comme l'indique le conducteur, il a essayé de stopper le véhicule en appuyant sur la pédale de frein mais celle-ci ne s'est pas enfoncée.

Appuyer sur la pédale de frein signifie qu'il n'y a plus d'appui sur l'accélérateur. Dès lors, les tensions analogiques de sortie des capteurs de l'accélérateur sont minimales mais non nulles (cf. § 3.3.1). Les valeurs numériques d'enfoncement de 100 % enregistrées sont alors incohérentes dans le cas d'un fonctionnement normal.

On serait alors tenté d'accorder un certain crédit à un évènement d'accélération subite et inattendue dû au véhicule.

Toutefois, comme indiqué au § 3.3.3.2, l'iBooster est conçu pour toujours permettre, même en cas de défaillance du moteur électrique, un freinage suffisamment puissant pour décélérer le véhicule par enfoncement de la pédale de frein conformément aux spécifications réglementaires.

En complément, deux autres points peuvent être soulignés.

Comme indiqué au § 3.4.1.3, le conducteur au moment de l'activation de l'AEBS avait très certainement son pied sur la pédale d'accélérateur, enfoncée environ à 25 % pour reprendre de la vitesse. De fait, par la multiplication des valeurs par le CAN, la valeur d'enfoncement de la pédale enregistrée devrait être de 100 %, puisque c'est déjà le cas sans appui sur l'accélérateur. Or la première valeur mesurée est de 95,6 %. Ce qui paraît incohérent. Cette analyse peut s'appliquer également à la troisième et cinquième valeur respectivement enregistrées à 93,6 % et 98,8 %.

D'autre part, peu de temps avant le premier choc au carrefour avec la rue de Tolbiac, une valeur d'enfoncement de l'accélérateur de 86,8 % a été enregistrée dans l'EDR, alors que toutes les autres sont égales à 100 %.

Cette valeur n'apparaît pas dans les enregistrements du fichier log, car l'EDR prend comme référence chronologique d'enregistrement le moment du choc, par essence aléatoire. Toutefois, grâce aux images de la caméra frontale, on peut recaler les deux ensembles de données dans le temps.

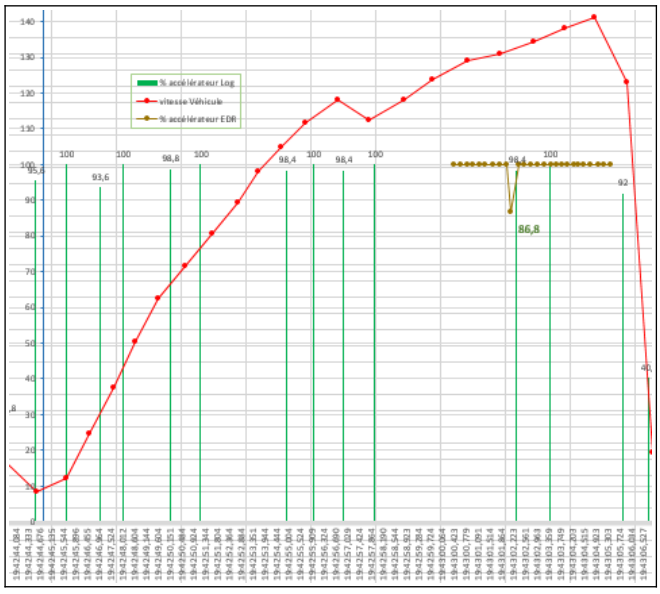


Figure 32 : vitesse et données d'enfoncement de l'accélérateur
(source : Tesla fichiers Log et EDR)

Pour les mêmes raisons, cette valeur est incohérente. En fait, les données d'enfoncement de l'accélérateur, dès que celui-ci est au repos, devraient toutes avoir la même valeur.

Par cette démonstration dite par l'absurde, le BEA-TT considère que l'hypothèse d'un problème technique ayant conduit à une accélération subite et imprévue du véhicule est dès lors improbable.

3.4.1.6 - Hypothèse d'une erreur du conducteur ayant entraîné l'accélération soudaine et imprévue

Sur la courbe de gauche de la figure 33, l'AEBS cesse d'être actif pratiquement au moment où la vitesse du véhicule est minimale (point 1). Toutefois, bien que l'accélérateur soit enfoncé à une valeur proche de 100 %, la vitesse enregistrée une seconde après (point 2) n'augmente que faiblement, suivant une accélération calculée de 1 m/s² (de 8,48 km/h la vitesse atteint 12,16 km/h).

Cette évolution de la vitesse n'est pas cohérente avec les capacités d'accélération d'un moteur électrique décrites dans le § 3.3.2 « Freinage à récupération ». Dès le point 2, l'accélération aurait dû être maximale.

La seconde suivante (point 3), la valeur enregistrée atteint 24,64 km/h. À partir de ce moment, la vitesse augmente rapidement suivant une accélération longitudinale, enregistrée dans le fichier log, pratiquement constante d'environ 3,5 m/s² jusqu'à une vitesse de 70 km/h puis suivant une accélération qui décroît mais dont la moyenne est autour de 2,5 m/s² pour atteindre une vitesse de 120 km/h.

L'évolution de ces valeurs, pour des positions enregistrées de l'accélérateur qui avoisinent la valeur maximale de 100 % d'enfoncement, semblent cette fois-ci cohérentes avec les valeurs fournies par Tesla.

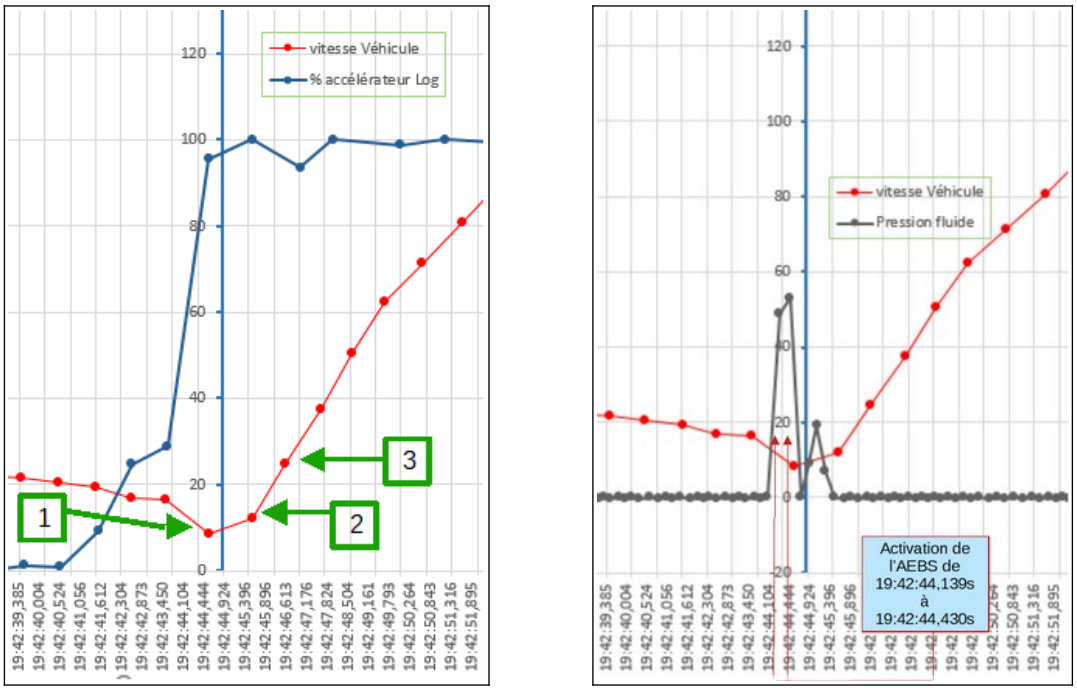


Figure 33 : courbes de la vitesse et de l'enfoncement de l'accélérateur (à gauche) et de la pression dans le circuit hydraulique de freinage (à droite)

S’il semble logique que l’enfoncement de la pédale d’accélérateur a annulé le freinage automatique commandé par l’AEBS (cf. § 3.3.3.7), on peut noter toutefois que le conducteur n’a pas fait état dans son témoignage de l’activation de ce système ; seule une passagère a entendu un son bref comme « un bip de réception de message sur un téléphone portable ». En revanche, le conducteur a indiqué avoir perçu un bruit comme celui d’un moteur électrique, jamais entendu par lui jusqu’au jour de l’accident, qu’il qualifie de bizarre et d’anormal.

Ce bruit correspond vraisemblablement à la mise en rotation maximale et rapide du moteur électrique de propulsion de la voiture.

De plus, ni le conducteur, ni les trois passagères n’ont fait état d’un signal lumineux s’affichant sur l’écran de contrôle indiquant une activation de l’AEBS.

Figure 34 : symbole indiquant l’activation de l’AEBS sur le panneau de contrôle
(source manuel du conducteur Tesla)

Le conducteur n’a donc pas interrompu le freinage automatique d’urgence par une action consciente.

La courbe de droite de la figure 33 présente la pression du circuit hydraulique de freinage enregistrée dans le fichier log. Comme précisé précédemment, l’activation de l’AEBS entraîne logiquement et rapidement une forte pression d’environ 50 bars, qui revient, au temps 19 h 42 min 44,715 s, à une valeur nulle après la fin d’activation de ce système.

On peut toutefois constater une augmentation de pression de 0 bar à 9 bars pour atteindre un maximum de 19,2 bars au temps 19 h 42 min 45,135 s pour s’annuler environ 0,5 s plus tard.

Le BEA-TT n’a pas d’explication à ce phénomène qui est intrinsèque au système, car les paramètres qui peuvent indiquer une action du conducteur sur la pédale, à savoir IBST_sinputRodDriver qui mesure l’enfoncement de la tige solidaire de la pédale de frein dans l’ibooster (cf. figure 21), IBST_driverBrakeApply et VCLEFT_brakeSwitchPressed qui enregistrent un enfoncement de la pédale de frein, ont tous une valeur enregistrée égale ou proche de 0. Cela signifie que **le conducteur n’a exercé aucune pression sur la pédale de frein.**

Ce n’est pas non plus un freinage automatique dû à l’AEBS car l’état de fonctionnement de ce système enregistré dans le fichier log par le paramètre « DI_aebState » indique, par la valeur « AEB_CAN_STATE_UNAVAILABLE », une indisponibilité de l’AEBS pendant une durée de 8 s immédiatement consécutive à la fin de son activation.

Enfin, l’ESP, système d’aide au maintien de la stabilité du véhicule, peut également augmenter la pression du liquide de frein si nécessaire en intervenant indifféremment sur les roues. Cependant, aucune donnée de son activation n’a été enregistrée dans le fichier log.

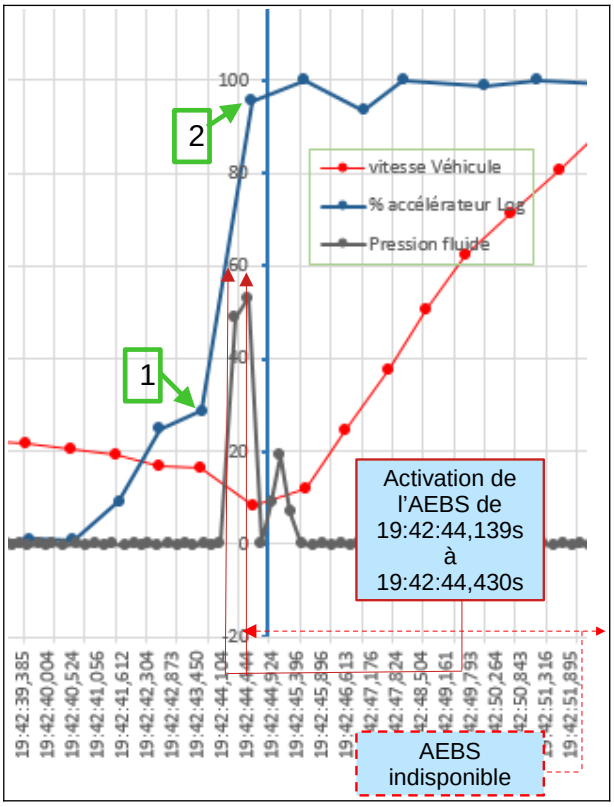


Figure 35 : courbe de la vitesse, de la pression du circuit hydraulique de freinage et de l'enfoncement de l'accélérateur

Le BEA-TT émet l'hypothèse suivante.

À l'approche des piétons, le conducteur relâche complètement l'accélérateur pour ralentir en utilisant le frein à récupération. Puis une fois suffisamment proche, et pour les dépasser, il réappuie sur l'accélérateur suivant ses habitudes de conduite prudente, comme cela a été enregistré lors des minutes précédentes.

À 28,8 % d'enfoncement (point 1), le couple moteur devrait être positif et d'environ 1 200 Nm, d'après les données fournies par Tesla, soit près de la moitié du couple maximal (3 000 Nm). Le conducteur s'attend logiquement à ce que le véhicule réaccélère.

Dans la fraction de seconde qui suit, il constate que le véhicule décélère fortement. Il ne réagit pas à son appui sur l'accélérateur. N'ayant pas perçu la brève notification sonore ou visuelle, ni détecté que le freinage automatique de l'AEBS s'est déclenché, d'autant qu'aucun obstacle a priori n'apparaît dans son champ de vision, il identifie probablement, au regard de ce qu'il perçoit, que le freinage à récupération est toujours actif, que compte tenu du mode d'arrêt « Hold », la voiture, à faible vitesse, va s'arrêter, et donc que l'appui exercé sur la pédale d'accélérateur est insuffisant. Dès lors, il réappuie sur l'accélérateur (point 2).

Cette action va désactiver le fonctionnement de l'AEBS. Toutefois, l'apparition d'une pression résiduelle à 20 bars dans le circuit hydraulique de freinage limite l'accélération du véhicule. Le conducteur constate une reprise de la vitesse, mais légère. Il identifie probablement que cette fois-ci, la voiture réagit conformément à ses actions. Dès lors on peut supposer qu'il reprend ses habitudes de conduite en faisant varier l'enfoncement de l'accélérateur pour bénéficier du freinage à récupération quand la vitesse lui semble trop élevée, soit autour de 30 km/h. Les premières valeurs de l'enfoncement mesurées à 95,6 %, 100 % puis 93,6 % semblent traduire ce mode de conduite.

Cependant, d'après les données fournies par Tesla, toute variation de l'enfoncement de l'accélérateur dans la plage de [80 % – 100 %] n'a aucune incidence sur le couple-moteur, celui-ci reste à son maximum. Il ne le constate qu'une vingtaine de mètres après la reprise de l'accélération.

Alors que dans le cas d'une variation de 30 % à 35 % de l'enfoncement de la pédale d'accélérateur, le couple-moteur augmente de 1 000 Nm à 1 400 Nm, soit une variation de +40 %, pour des vitesses comprises entre 30 km/h et 80 km/h.

3.4.1.7 - Phase d'accélération avant le heurt du cycliste

Dans son témoignage, le conducteur indique qu'au moment où il perçoit que le véhicule ne répond pas correctement à ces appuis sur l'accélérateur, il a le réflexe de freiner, en retirant son pied de l'accélérateur. Constatant que la pédale de frein ne s'enfonce pas, il utilise son pied gauche en plus du droit pour exercer une pression supplémentaire.

À partir de la vidéo enregistrée par la caméra de surveillance de la Préfecture de police, on distingue que les feux stop arrière s'allument au moment de l'activation de l'AEBS puis s'éteignent rapidement et ne se rallument pas pendant les 4 s suivantes. À ce moment, le véhicule circule alors à une vitesse de 50 km/h (cf. figure 36).

feux arrière stop allumés à t=0 s

véhicule à t=1 s

véhicule à t=2 s

véhicule à t=3 s

véhicule à t=4 s, vitesse de 50 km/h

Figure 36 : position du véhicule dans les secondes qui ont suivi l'allumage des feux
(source : Préfecture de police)

L'absence d'allumage des feux arrière après l'activation de l'AEBS vient confirmer les données enregistrées dans le fichier log et indiquent, compte tenu de la conception de l'iBooster, qu'il n'y a pas eu d'appui sur la pédale de frein.

Deux points supplémentaires viennent confirmer l'absence d'appui sur la pédale de frein. D'une part, d'après Tesla en réponse à une question du BEA-TT, un appui simultané sur les deux pédales alors que l'accélérateur était préalablement enfoncé entraîne automatiquement un arrêt de la propulsion par l'annulation du couple-moteur dont la valeur est imposée à 0 Nm en un quart de seconde. Le véhicule continue à avancer sur

son erre mais les forces de résistance à l'avancement vont réduire la vitesse, ce qui n'a pas été constaté.

D'autre part, si l'accélérateur a été relâché, le freinage à récupération entraîne une diminution de la vitesse, plus élevée que dans le cas précédent, et un allumage des feux stop comme l'impose le règlement n° 13H. Ce qui n'a pas été le cas.

On peut alors supposer que le conducteur a gardé son pied sur l'accélérateur, ou l'a effectivement déplacé vers la pédale de frein, mais l'a alors probablement posé en dessous, tout en conservant un appui sur l'accélérateur avec une partie de son pied.

Ceci est probable car comme indiqué au § 3.3.1 et présenté en figure 18, la pédale d'accélérateur une fois enfoncée à son maximum est écartée de la pédale de frein, en position haute, d'environ 10 cm. Le conducteur aura alors effectué une rotation du pied à partir du talon posé au sol, préférentiellement positionné dans l'axe de l'accélérateur. En effet, si le talon est positionné dans l'axe de la pédale de frein et que le pied est orienté vers l'accélérateur, il est très probable que dans un mouvement de rotation vers la gauche le pied vienne alors heurter la pédale de frein.

Par la suite, en arrivant au niveau de l'intersection avec la rue de la Pointe d'Ivry sur la gauche, soit environ 45 m après avoir croisé les piétons sur la chaussée, le conducteur a braqué pour s'insérer dans les voies cyclistes à la vitesse de 60 km/h et éviter ainsi de percuter le véhicule devant lui qui a stoppé (cf. figure 37), comme il l'a témoigné.

Figure 37 : véhicule Tesla en approche de la rue de la Pointe d'Ivry à 19 h 42 min 49 s
(source : véhicule Tesla, légendée BEA-TT)

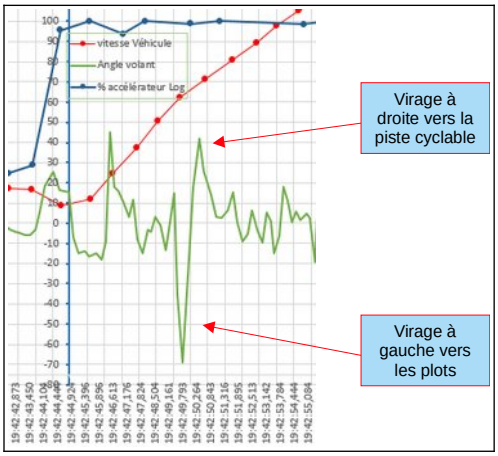


Figure 38 : vitesse et angle au volant en approche de la rue de la Pointe d'Ivry
(source : véhicule Tesla, légendée BEA-TT)

Dans son témoignage, le conducteur indique avoir effectué cette manœuvre dans le but également de réduire la vitesse en bénéficiant du freinage d'urgence de l'AEBS en approche des bornes jaunes à bandes blanches. La lecture du fichier log indique que le système AEB était toujours indisponible, et que la pression dans le circuit de freinage reste à une valeur nulle pendant cette phase.

3.4.1.8 - Heurt du cycliste

Poursuivant son accélération, le véhicule Tesla rattrape un cycliste et le percute par l'arrière à une vitesse d'environ 118 km/h. L'AEBS, à nouveau opérationnel et qui d'après Tesla fonctionne jusqu'à une vitesse maximale de 150 km/h, n'a pas détecté le cycliste devant le véhicule à une dizaine de mètres, ni légèrement sur la droite par rapport à l'axe du véhicule au moment du choc. Il n'y a eu ni avertissement ni freinage automatique d'urgence.

Pourtant les résultats des 3000 essais (cf. § 3.3.4) fournis par Tesla montrent une densité forte de points autour du véhicule dans toutes les directions, laissant supposer des performances de détection élevées, pour de telles cibles à des distances proches et inférieures à une vingtaine de mètres.

Figure 39 : position du cycliste avant le choc à 19 h 42 min 56 s
(source : véhicule Tesla)

Le choc a entraîné une modification de la vitesse des roues avant droite et arrière gauche, représentée sur la courbe de gauche de la figure 40.

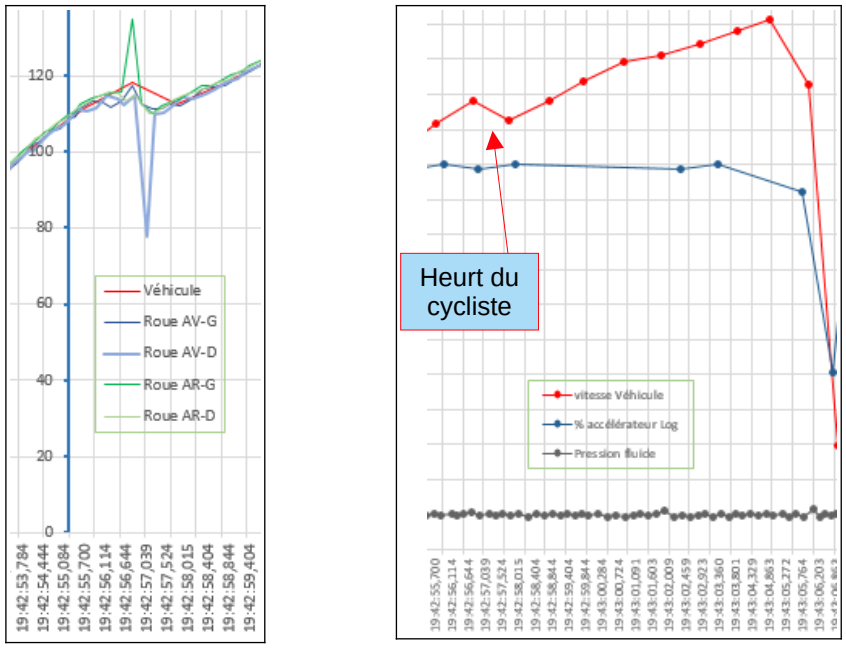


Figure 40 : vitesses au moment du heurt du cycliste, pression du liquide de frein et % enfoncement accélérateur

Mais la décélération résultante n'a pas été suffisante pour enclencher l'activation des airbags. L'enfoncement de l'accélérateur reste proche d'une valeur maximale, et la pression du circuit hydraulique de freinage est nulle.

Le conducteur a témoigné ne pas se souvenir du moment du choc avec le cycliste. Il est plausible qu'une grande partie de son attention était focalisée à guider son véhicule et à le maintenir dans cette voie étroite avec des aménagements de bord de voie réduisant la largeur et nécessitant un guidage précis.

3.4.1.9 - Dernière phase d'accélération

Par la suite, le véhicule Tesla a poursuivi son accélération et le conducteur, par des actions sur le volant, a maintenu le véhicule dans les pistes cyclables, en évitant les rétrécissements de chaussée dus aux aménagements de rive jusqu'au carrefour avec la rue de Tolbiac. À ce moment, le conducteur a légèrement déporté sa voiture sur la gauche pour la positionner à cheval sur le trottoir et la piste cyclable. Le véhicule a ensuite percuté à environ 140 km/h les divers éléments du mobilier urbain, et le véhicule utilitaire présents dans le carrefour.

Figure 41 : arrivée du véhicule au niveau du carrefour avec la rue de Tolbiac
(source : Tesla)

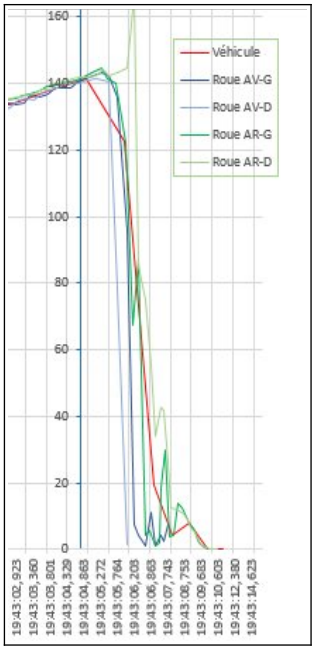


Figure 42 : vitesses des roues et du véhicule Tesla au moment des chocs

Au temps 19 h 43 min 05,05,635 s, donc au moment des premiers chocs avec le mobilier urbain, un appui sur la pédale de frein a été enregistré par les paramètres « VCLEFT_brakeSwitchPressed » et « IBST_driverBrakeApply » et un déplacement de 0,7 mm de la tige de la pédale de frein dans l'iBooster (cf. figure 21) a été mesuré, ainsi que des accélérations latérales de –8 m/s² et longitudinale de –1 m /s². Il faut toutefois considérer cet enfoncement de la pédale de frein, certes léger, comme consécutif aux forces résultantes dynamiques créées à ce moment-là et non comme étant une action du conducteur.

3.4.2 - Les données récupérées sur la voiture et l'analyse mécanique de celle-ci

L'Institut de recherche criminelle de la Gendarmerie nationale (IRCGN), missionné par la justice pour expertiser le véhicule, rapporte les informations ci-dessous.

Dans l'habitacle, un tapis de sol a été rajouté au niveau du poste de conduite. De nombreux essais dans différentes configurations ont été réalisés afin d'examiner si un éventuel blocage de la pédale de frein ou d'accélérateur a pu survenir dans la conduite du véhicule par la présence de cet accessoire.

Après vérifications, l'IRCGN conclut, comme l'avaient fait les services de police au moment de l'accident, que ce tapis disposait de solides points de fixations et que l'actionnement de chaque pédale n'a pas été entravé compte tenu de l'espace résiduel. Au niveau du système de freinage, les différents composants et les pièces d'usure étaient dans un bon état, exceptés ceux qui ont été endommagés suite aux chocs violents.

Les airbags ayant été déclenchés en fin de phase d'accélération, il a été possible d'extraire des données du calculateur de gestion de ces équipements, enregistrées par l'EDR. En particulier, il apparaît que deux chocs ont été enregistrés, et pour chacun d'eux, plusieurs données cinématiques et d'activation de systèmes embarqués ont été extraites sur une période de 5 s avant chaque évènement. Les types de données enregistrées sont néanmoins moins nombreux que celles du fichier log.

Les données de l'EDR ont également été fournies au BEA-TT par Tesla. Celles-ci ont été enregistrées sur les serveurs de la société après l'accident puisque le rapport Tesla correspondant date du 14 décembre 2021, soit trois jours après l'évènement.

Un premier choc a été enregistré à la vitesse de 142 km/h. Il a probablement eu lieu contre le poteau de la photo de la figure 43, de section plus importante que celles des poteaux du panneau d'interdiction de tourner-à-gauche et du mobilier urbain présents en amont. Un deuxième choc a été enregistré 0,7 s plus tard à la vitesse de 58 km/h. Pour l'IRCGN, il s'agit du heurt du conteneur à verre (cf. figure 4 et 12).

Figure 43 : photo de gauche, pied du poteau figurant entouré sur la photo de droite
(sources véhicule Tesla et google maps - août 2022, légendée BEA-TT)

Pour rappel, un enfoncement de l'accélérateur de 86,8 % a été enregistré dans l'EDR 3,2 s avant le premier choc.

En s'aidant des vidéos enregistrées par la caméra frontale du véhicule, il est probable que cette valeur a été enregistrée à l'approche d'une zone de stationnement de Vélib' sur la gauche à proximité d'un passage piéton, entraînant une réduction de la largeur de voie.

La lecture de la vidéo dont est extraite l'image figure 44 montre un déport de la Tesla sur la droite en amont. Les valeurs de l'angle au volant enregistrées dans l'EDR, comptées positivement sur la droite, sont chronologiquement de +6°, +7°, +26°, cette valeur correspondant à l'enfoncement de la pédale d'accélérateur à 86,8 %, puis à nouveau +7°, −6° et −12° ; cette série de valeurs d'angle au volant peut se traduire par un écart de la voiture sur la droite puis un retour sur la gauche.

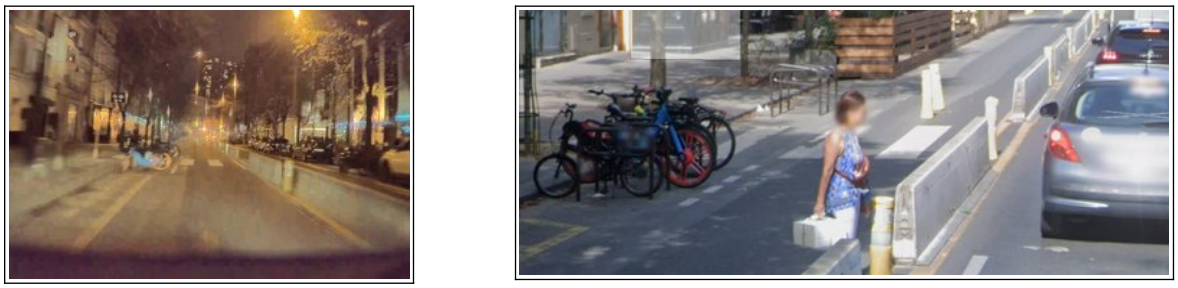


Figure 44 : aménagement en rive *(source : véhicule et google-maps)*

Il semble donc, au vu des données du fichier log et de l'EDR, et compte tenu du fonctionnement de l'iBooster, qu'aucun appui sur la pédale de frein de la part du conducteur n'a été réalisé pendant la totalité de la phase d'accélération qui a duré une vingtaine de secondes jusqu'au premier choc contre un poteau au niveau du carrefour avec la rue de Tolbiac.

4 - Analyse du déroulement de l’accident

Le samedi 11 décembre 2021 vers 20 h 45, un véhicule léger de marque Tesla de modèle « Model 3 », conduit par un chauffeur de taxi qui n’est plus de service à cette heure-là se dirige vers le sud de Paris en empruntant le périphérique intérieur. Avec sa femme et ses deux filles ils ont décidé de dîner dans le quartier asiatique du 13^{e} arrondissement.

Considéré comme prudent par les membres de sa famille, il conduit depuis quelques mois une voiture électrique, mais a auparavant conduit des voitures automatiques dont le fonctionnement à deux pédales s’apparente à celui de la Tesla.

Le véhicule quitte le périphérique en sortant à la porte d’Ivry puis emprunte l’avenue éponyme à sens unique en direction du nord vers la place d’Italie. Depuis le boulevard des Maréchaux, des glissières béton de 4 m de long alternant avec des bornes de signalisation temporaire, installées par la ville de Paris, séparent la chaussée en deux parties. Celle de droite permet aux véhicules routiers de circuler sur une voie à une vitesse maximale autorisée de 30 km/h, alors que celle de gauche a été aménagée en piste cyclable à double sens.

Le conducteur du véhicule Tesla circule dans la première moitié de l’avenue d’Ivry à une vitesse inférieure, à environ 20 km/h et utilise le freinage à récupération pour la moduler en fonction des véhicules qui le précèdent et de ceux provenant des rues embranchées prioritaires. Bien que la voiture soit équipée de nombreux systèmes automatisés d’aide à la conduite, le conducteur n’a engagé ni le régulateur de vitesse dynamique ni le maintien dans la voie. La conduite est manuelle.

Environ 500 m avant le carrefour avec la rue de Tolbiac, le conducteur ralentit, en relâchant l’accélérateur, à l’approche de deux piétons qui se trouvent à droite sur la chaussée à côté de voitures stationnées. Un peu en amont de ces piétons, le conducteur appuie légèrement sur l’accélérateur pour reprendre de la vitesse et les dépasser. L’enfoncement de la pédale d’accélérateur apparaît progressif jusqu’à 28 %, ce qui devrait accélérer la voiture comme cela a été le cas jusqu’à présent. Cependant, la vitesse décroît fortement de 18 km/h à 8 km/h.

À leur hauteur, un son bref, identique à celui signalant la réception d’un sms sur un téléphone portable, retentit dans l’habitacle. Ce son n’est entendu que par une de ses filles assises à l’arrière. Aucun symbole particulier n’est aperçu sur l’écran de contrôle par une des personnes présentes dans l’habitacle.

Ce signal sonore a été émis par l’AEBS qui s’est déclenché à ce moment-là, ce qui freine fortement le véhicule. Cependant, le conducteur n’en a pas connaissance et probablement identifie cette décélération comme étant due au freinage à récupération. Le conducteur appuie à nouveau sur l’accélérateur concomitamment au freinage automatique de sécurité et suffisamment pour désactiver ce freinage automatique. À ce moment, la pédale d’accélérateur est enfoncée à une valeur proche de 95 %, puis les secondes suivantes à 100 % et 93 %.

Ces valeurs fluctuantes correspondent au mode de conduite du conducteur, représenté sur la figure 24 avant l’activation de l’AEBS par des valeurs d’enfoncement variables en permanence, consécutives aux appuis de son pied dans un mouvement continu de haut en bas, et inversement, pour contrôler l’accélération et la décélération par le freinage à récupération.

Il constate dès lors que le véhicule ne répond pas à ces appuis sur l’accélérateur, et rapidement comprend qu’il n’en maîtrise plus la vitesse.

Pour éviter le véhicule précédent qui s’arrête, le conducteur profite du carrefour avec la rue de la Pointe d’Ivry sur la gauche pour s’en écarter et choisit d’emboutir les plots jaunes balisant la piste cyclable pour essayer de freiner, voire stopper le véhicule avec le freinage automatique d’urgence. Cela n’a aucun effet car à ce moment-là l’AEBS est encore inopérant, la donnée caractérisant l’état de ce système étant « AEB_CAN_STATE_UNAVAILABLE », et le véhicule continue d’accélérer. Le conducteur braque alors en direction de la piste cyclable, et par des coups de volant arrive à y circuler en évitant les aménagements en bord de chaussée et les glissières béton sur le côté droit.

Dès ce moment, toute son attention est focalisée sur ces actions de guidage. Il percute cependant mortellement par l’arrière un cycliste qui ne pouvait s’attendre à ce danger. À l’approche du carrefour avec la rue de Tolbiac, en bout de piste cyclable, des véhicules sont arrêtés au feu tricolore. Le conducteur braque légèrement sur la gauche pour s’en écarter, roule à cheval sur le trottoir et percute à 140 km/h le mobilier urbain, ainsi que des Vélib’s stationnés, un conteneur à verre qui explose, puis un véhicule utilitaire léger circulant dans la rue de Tolbiac qui le stoppera. Une vingtaine de blessés divers sont comptabilisés par les services de secours.

5 - Analyse des causes et facteurs associés, orientations préventives

Les nombreuses données enregistrées par le véhicule ont permis de comprendre les circonstances. Toutefois leur qualité pourrait être améliorée. Deux orientations de sécurité sont également proposées en lien avec le fonctionnement de l'AEBS et de son interface homme-machine, ainsi qu'avec le freinage à récupération, indispensable à l'efficacité du fonctionnement des véhicules électriques.

5.1 - Analyse critique des données de l'EDR et du fichier log

5.1.1 - Données de l'EDR

Le règlement n° 160 UNECE a pour objet de garantir que les EDR enregistrent, sous un format prêt à l'emploi, des données utiles permettant de mener des enquêtes efficaces en cas d'accident et d'analyser les performances des équipements de sécurité (systèmes de retenue avancés, par exemple). Ces données aideront à mieux comprendre dans quelles circonstances se produisent les accidents et les blessures et, ainsi, faciliteront la conception de véhicules plus sûrs.

Comme constaté dans la partie analyse et conformément au règlement, le temps d'enregistrement des diverses données ne couvre qu'une période de 5 s. Cette durée d'enregistrement rend impossible une compréhension des circonstances et donc l'identification des causes et des facteurs ayant pu participer à l'accident. Il est nécessaire de pouvoir disposer de données équivalentes à celles du fichier log, sinon l'objectif du règlement n°160 ne serait que partiellement atteint.

Pour en apprécier une durée adaptée, on peut se référer aux méthodes académiques d'analyse d'accident, dont une, développée par l'INRETS[14], considère le conducteur humain (H), son véhicule (V) et l'environnement (E) comme un système de déplacement qui produit de la mobilité et dont la production ou « sortie » attendue est la satisfaction des besoins en déplacement du conducteur. Chaque composante HVE ne fonctionne pas indépendamment des deux autres, de telle sorte que modifier l'une d'entre elles détermine des modifications dans ses relations avec les deux autres. C'est un système complexe, car il évolue en permanence, et dans lequel le conducteur reste l'élément principal puisqu'il « conduit » et interagit avec le système, y compris dans le cas d'un véhicule hautement automatisé, puisqu'une reprise de la conduite par le conducteur peut toujours être nécessaire. Ceci ne sera plus le cas lorsque les véhicules totalement automatisés seront autorisés à circuler.

Pierre Van Eslande, dans le document INRETS « L'erreur humaine dans les scénarios d'accident, cause ou conséquence ? » précise que dans ce système HVE le conducteur a pour charge de réguler et de s'ajuster aux difficultés qui proviennent des interactions entre les différents composants, y compris lui-même. Pour réaliser cet ajustement, il doit mettre en œuvre un certain nombre de fonctions qui vont de la perception à l'action, en passant par des étapes cognitives de compréhension, d'anticipation et de prise de décision.

Le système n'étant pas conçu dans le but de produire un accident, ce dernier apparaît comme le symptôme d'une défaillance au niveau des adaptations entre ses composantes. L'objectif de l'analyse d'un accident est de préciser les évolutions des interactions entre composantes, processus qui se définit comme un enchaînement de faits qu'il faut situer

14 Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, intégré au sein de l'Université Gustave Eiffel UGE

dans le temps et l'espace, et par une logique causale qui relie ces faits entre eux. Ce qui se passe à une étape dépend de l'état du système à l'étape précédente.

Ce modèle séquentiel définit quatre phases :

1. La phase de conduite est la situation « normale » pour le conducteur. Elle est normale parce que ses exigences sont sans surprise. L'adaptation du conducteur est efficace, les faits s'enchaînent selon ses prévisions, ses attentes et ses anticipations. Il contrôle sa vitesse et sa trajectoire. Plus fondamentalement, cela veut dire qu'il y a adéquation entre les sollicitations et les capacités de réponse des éléments du système les uns envers les autres : tracé, adhérence, distance de sécurité, distance de visibilité, état des amortisseurs, vitesse, degré de vigilance du conducteur. L'intérêt de cette phase est de révéler ce que le conducteur estime à la fois souhaitable et réalisable à cet endroit et dans ce contexte, et comme précisé ci-avant, cette phase appartient au processus de l'accident, puisque ce qui va suivre dépend de ce qui précède.

Dans le cadre de ce rapport, cette phase correspond au trajet du véhicule accidenté sur le périphérique jusqu'à l'avenue d'Ivry. La lecture des vidéos des caméras périphériques de la Tesla montre une conduite apaisée, en permanence sur la troisième voie du périphérique est en partant de la droite, en conservant une distance de 5 m à peu près avec le véhicule qui le précède, sans utiliser la puissance élevée de sa voiture pour changer de voie et circuler plus rapidement. Le véhicule emprunte la sortie quai d'Ivry et poursuit dans l'avenue d'Ivry suivant ces conditions de conduite, en particulier avec un environnement lié à la présence des voies cyclistes, réduisant de fait la largeur de l'avenue. Les conditions de conduite sont représentées par la figure 24.

2. La phase de rupture correspond à un événement imprévu qui interrompt la phase de conduite en détruisant son équilibre et de ce fait met le système en danger. Cette phase est très brève et correspond en fait à l'interface entre la phase de conduite qui la précède et la phase d'urgence qui lui succède. L'effet de la phase de rupture est de faire passer les composants d'un niveau de sollicitation tolérable à un niveau de sollicitation brutalement excessif, en regard de leurs limites de fonctionnement : le conducteur doit être capable de comprendre et de réagir en quelques dixièmes de seconde, le véhicule doit être en état de répondre à des sollicitations dynamiques élevées, la liaison véhicule-sol doit être d'excellente qualité.

L'élément imprévu qui va faire basculer la conduite vers une situation d'urgence se situe au niveau de la forte décélération consécutive à l'activation automatique de l'AEBS. N'ayant pas identifié l'état de ce système dont l'alarme associée a été trop brève, le conducteur va enfoncer l'accélérateur à son maximum, entraînant la désactivation de l'AEBS et une augmentation élevée et rapide de la vitesse, sans que le conducteur n'en comprenne la raison.

3. La phase d'urgence recouvre l'espace-temps compris entre la phase de rupture et le choc. Si la phase de rupture constitue l'énoncé d'un problème vital, la phase d'urgence est le crédit d'espace temps accordé pour le résoudre. Par définition, ce crédit est dramatiquement limité en espace comme en temps. Tout le problème du conducteur est de savoir l'utiliser au mieux sans gaspillage.

Ce qui caractérise la phase d'urgence relativement à la phase de conduite est le niveau de sollicitation soudainement élevé imposé aux composants du système. Le conducteur doit résoudre en temps imposé un problème auquel il n'a jamais été confronté. L'éventail des solutions dépend de ce que contient l'environnement en termes d'obstacles agressifs et/ou en termes d'espace pour un évitement. La capacité du véhicule à réaliser la

manœuvre exigée dépend de sa conception, de l'état de ses équipements, mais aussi de l'état des infrastructures pour ce qui est de la liaison véhicule-sol.

Dans le cas de l'accident, cette phase peut être représentée par la phase d'accélération non maîtrisée. En premier lieu, le conducteur, d'après ses dires, essaie de freiner par des actions supposées sur la pédale de frein. Constatant l'absence de résultat, il a suffisamment de conscience pour décider de bifurquer dans la voie cycliste par une manœuvre sur le volant afin d'éviter le véhicule qui le précède et d'utiliser le système de freinage d'urgence face aux plots. En revanche, lorsque la vitesse devient trop élevée, son attention semble focalisée sur sa conduite pour maintenir le véhicule dans la voie cycliste en y évoluant suivant les aménagements en rive. La présence du cycliste ne sera pas perçue.

4. La phase de choc englobe la nature du choc et ses conséquences. Elle détermine la gravité de l'accident en termes de dommages matériels et corporels.

Dans le cas présent, les chocs espacés d'une part avec le cycliste puis avec le mobilier urbain, et les autres véhicules dans le carrefour avec la rue de Tolbiac encadrent une seconde phase d'urgence. Toutefois, comme pour la première, le problème n'a pas pu trouver de solution.

De fait, l'analyse précise de ces phases reliées chronologiquement et causalement ne peut se faire à partir de l'analyse des données enregistrées sur une période de 5 s, bien inférieure à cette séquence accidentelle dont la première phase de rupture a lieu 20 s avant le choc final.

Cette courte durée d'enregistrement est spécifiée par le règlement n° 160 UNECE qui fixe les exigences minimales de collecte, de stockage et de survie des données en cas d'accident. Par définition, l'EDR est un dispositif ou une fonction qui enregistre les données dynamiques pendant la période précédant immédiatement un événement ou pendant un accident aux fins de la récupération des données d'une quarantaine de paramètres après l'accident. Les données audio et vidéo n'en font pas partie.

Il serait dès lors préférable de disposer d'un enregistrement d'une durée plus longue. Au vu de cet accident et du modèle séquentiel décrit qui considère la phase de conduite normale comme un élément important du processus accidentel, une durée de 30 s semble un minimum.

D'autres considérations, pour en déterminer une durée pertinente, peuvent être mises en avant.

Dans le cadre des enquêtes d'accident sur un passage à niveau (PN), le BEA-TT a été confronté à différentes hypothèses au regard de l'évolution du véhicule et du comportement du conducteur avant l'accident :

1 - soit le véhicule était en approche et le conducteur n'a pas tenu compte des signaux lumineux et des barrières abaissées, de manière volontaire (passage en chicane en contournant les barrières) ou involontaire (non-perception des signaux) ;
2 - soit le conducteur a pu être surpris de l'abaissement des barrières au moment de pénétrer sur le platelage du PN et a pu freiner de manière brusque entraînant l'arrêt du moteur ;
3 - soit il a pu être bloqué entre les barrières d'entrée et de sortie dans le cadre d'un système de fermeture du PN à 4 barrières et ne pas savoir quoi faire, y compris évacuer du véhicule pour se mettre à l'abri ;
4 - soit par une manœuvre sur le volant inadaptée faisant suite aux indications de son système GPS dans le cadre d'un guidage, il a pu prématurément manœuvrer sur le platelage et tomber sur les voies ferrées et ne plus pouvoir en sortir.

Parmi certaines de ces situations, le délai d'enregistrement de 5 s est insuffisant pour lever les doutes sur les circonstances qui ont prévalu. En particulier dans le cas du décès du conducteur, l'absence de témoin rend impossible toute compréhension des faits. Le temps d'arrivée du train sur le PN, en France, est légèrement supérieur à 20 s à partir de l'allumage des feux rouges clignotants. Cette valeur de temps est le seuil minimal imposé par la réglementation.

Les PN automatisés sont largement majoritaires. Certes, SNCF Réseau a mis au point un système de vidéosurveillance pour détecter tout obstacle à la circulation des trains sur ces infrastructures, mais le coût limitera probablement son déploiement, et ce système n'a pas pour objet de permettre une analyse de l'accident.

Or cette problématique d'accidents aux passages à niveau est partagée mondialement. Dans ces scénarios, la phase de rupture du modèle séquentiel peut être le début de l'allumage des feux rouges clignotants, ou l'abaissement des barrières. Dès lors un temps de 30 s paraît minimal.

En août 2016, une étude[15] commandée par la NHTSA a montré dans de nombreux accidents qu'un délai de 5 s d'enregistrement était insuffisant pour déterminer tous les facteurs qui y ont participé ou pour identifier l'ensemble des actions réalisées par le conducteur pour les éviter, dans trois scénarios particuliers que sont la collision par l'arrière, la collision aux intersections et la sortie de route. Une extension de ce délai à 20 s permet de comprendre et d'expliquer les circonstances à hauteur du 90e percentile. L'analyse a montré complémentairement qu'il est nécessaire, pour éviter de mauvaises interprétations des circonstances, d'augmenter la fréquence de 2 Hz d'enregistrement de ces paramètres, spécifié dans le règlement n° 160 UNECE, à 10 Hz.

Dans la continuité, la NHTSA a publié en juin 2022 un avis de projet de réglementation (NPRM[16]) reprenant les résultats de l'étude ainsi que des données sur le volume de mémoire informatique supplémentaire et le coût direct induit. Pour une durée d'enregistrement de 20 s à une fréquence de 10 Hz, il est nécessaire d'augmenter la mémoire de 1,33 Kb, soit de multiplier la mémoire initiale par un coefficient de 2,43. Le coût associé de cette extension était estimé à 0,003 $ (US dollars)[17].

Au niveau européen, le règlement UE 2019/2144 relatif à la réception par type des véhicules à moteur prévoit l'installation d'un enregistreur de données d'événement qui enregistre l'ensemble des paramètres du règlement UNECE n° 160 suivant les spécifications définies, ainsi que tous les systèmes, installés à bord, de sécurité active et d'évitement des accidents. Toutefois, le délai d'enregistrement des paramètres n'en sera pas modifié.

Dans le cadre de l'accident d'un véhicule Tesla et d'un camion semi-remorque ayant eu lieu en Floride en septembre 2017, le NTSB[18] recommandait à la NHTSA et à l'US Department of Transportation (DOT) d'identifier les données nécessaires à la compréhension du fonctionnement des ADAS, de leur état et de leurs actions sur le contrôle du véhicule, ainsi que la fréquence et la durée des enregistrements des paramètres. L'objectif[19] était de pouvoir caractériser de manière adéquate les performances et les comportements du conducteur et du véhicule avant et pendant un accident.

Le NTSB considère que ces recommandations sont non satisfaites à ce jour.

15 NHTSA : Results of event data recorders pre-crash duration study : a report to Congress
16 NPRM : notice of proposed rulemaking
17 https://www.federalregister.gov/documents/2022/06/22/2022-12860/event-data-recorders
18 NTSB : National Transportation Safety Board
19 https://www.ntsb.gov/news/Documents/Response-NHTSA-NPRM-Event-Data-Recorders.pdf

Enfin, bien que n'ayant pas de lien direct avec l'accident objet du présent rapport, le BEA-TT souligne que différents types d'ADAS coexistent à bord des véhicules. Le document du comité des experts du CNSR[20] intitulé « Aides à la conduite[21] » en identifie, à la date de publication de son rapport, une soixantaine parmi ceux qui informent le conducteur, ceux qui l'alertent, ceux qui en améliorent ses performances ou celles du véhicule, et ceux qui exercent à la place du conducteur une ou plusieurs tâches de conduite.

Des éléments d'expertise sur l'impact que leur usage pourrait induire sur l'activité de conduite sont également présentés, au travers de quatre types de risques : ceux concernant les actions motrices de la conduite, ceux induits par les modifications de prises d'information, ceux relatifs à la connaissance qu'ont les conducteurs des performances et des limites des systèmes, et ceux concernant l'accessibilité des informations sur le fonctionnement des systèmes.

Ces systèmes sont nombreux et présentent une forte hétérogénéité, tant dans leur fonctionnement que dans l'aide apportée au conducteur, d'autant que peu d'entre eux sont réglementés. Leur contribution à la sécurité dépend donc de nombreux paramètres et de la manière dont ils sont utilisés selon le contexte.

Enfin, le Dutch Safety Board[22], comme d'autres organismes ayant analysé l'impact de l'automatisation des véhicules sur la conduite, met en particulier en avant que la conduite avec de tels systèmes devient à la fois plus difficile et plus facile. L'automatisation signifie que des tâches relativement simples peuvent être prises en charge et exécutées à un niveau de sécurité constant et plus élevé. Les tâches difficiles sont laissées aux conducteurs. L'automatisation modifiant la tâche humaine, les conducteurs doivent toutefois rester « constamment vigilants » au cas où le système ne saurait pas ce qu'il faut faire ou interviendrait à tort. Il en résulte une situation paradoxale dans laquelle certains systèmes d'aide à la conduite, qui sont censés aider ou faciliter les tâches de conduite, peuvent à des degrés divers la compliquer.

Nonobstant cela, d'autres améliorations pourraient grandement aider à la compréhension des accidents, compte tenu des technologies installées sur les véhicules et des capacités informatiques et électroniques associées des différents systèmes.

Sur la figure 45, la courbe bleue représente les données de l'accélération longitudinale, enregistrées par l'EDR du véhicule impliqué, au pas de 0,1 s. En orange, les données, au pas de 0,5 s, qui seraient issues d'un EDR conforme au règlement n° 160 UNECE.

La comparaison des courbes montre évidemment que la fréquence d'enregistrement de 2 Hz réglementaire ne suffit pas à apprécier avec toute la précision nécessaire les évolutions cinématiques du véhicule, comprenant des pics et des creux pouvant apparaître entre deux enregistrements, à l'inverse d'une fréquence plus élevée de 10 Hz.

Cette fréquence d'échantillonnage de 2 Hz est également imposé par le règlement pour la vitesse, les positions de l'accélérateur, le régime du moteur, l'état du frein de service, l'activité du système ABS, le contrôle de stabilité, les impulsions à la commande direction, l'état de l'AEBS, le système de régulation de la vitesse, l'état du système d'alerte de franchissement de ligne, l'état de la fonction de rectification de trajectoire, et les différents paramètres d'accélération longitudinale et angulaire.

20 CNSR : conseil national de la sécurité routière
21 Conseil national de la sécurite routiere - comité des experts - Aides à la conduite - 2023
22 Dutch Safety Board - Who is in control ? Road safety and automation in road traffic - 2019

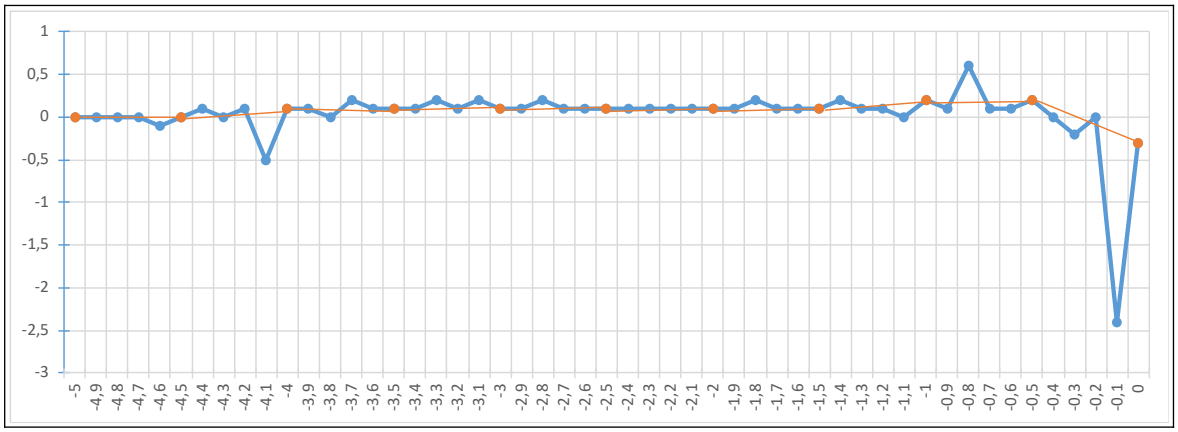


Figure 45 : données de l'accélération longitudinale (unité : g) sur 5 s avant le premier choc

De même, sur la figure 46 sont représentées cette fois-ci les données de l'accélération latérale durant les 5 s avant le deuxième choc. En plus des remarques précédentes, on peut noter que la courbe orange, suivant les spécifications du règlement n° 160, serait possiblement écrêtée car une plage minimale, de +1 g à −1 g, est spécifiée, alors qu'elle est définie, étonnamment, de – 50 g à +50 g après le choc.

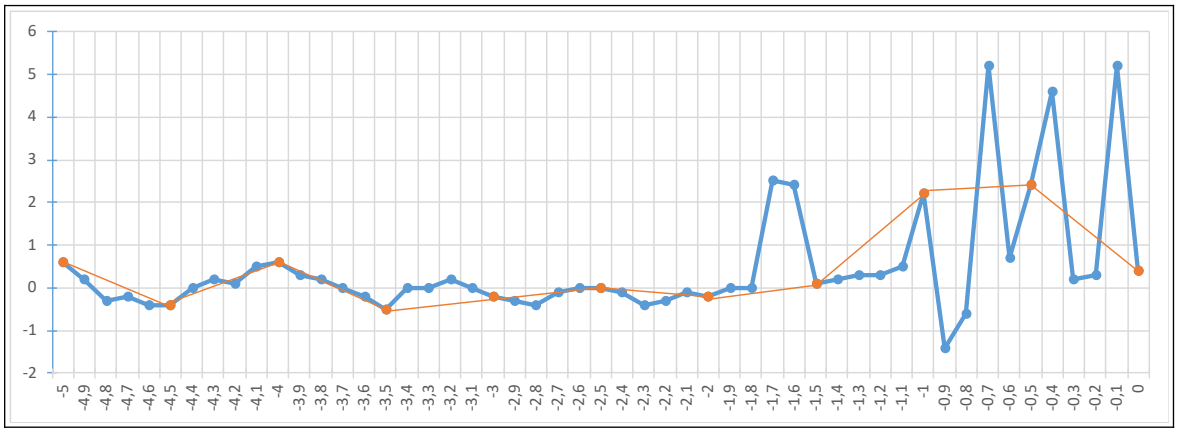


Figure 46 : données de l'accélération latérale (unité : g) 5 s avant le deuxième choc

En conséquence, au regard de cette analyse relative à l'EDR, il est proposé de modifier le règlement n° 160 UNECE. Pour répondre de manière optimale à son objectif, le BEA-TT recommande :

Recommandation R1 adressée à la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) :

Proposer dans les instances UNECE une augmentation de la durée et de la fréquence d'enregistrement des données d'évènement, ainsi qu'une extension des plages minimales d'enregistrement précédant un choc ;

Proposer d'intégrer en plus des systèmes dits de sécurité conformément au règlement UE 2019/2144, des paramètres des systèmes pouvant avoir une action sur les organes de contrôles du véhicule.

5.1.2 - Données du fichier log

Dans la continuité des remarques sur l'EDR, les données enregistrées à bord des véhicules mais non équipés de ce système d'enregistrement pourraient avoir les caractéristiques souhaitées permettant de comprendre précisément ce qu'il s'est passé.

Concernant Tesla, une première remarque peut être faite à la suite de ces observations. Compte tenu des éléments supra relatifs à l'impact de certains ADAS sur la conduite, à l'absence de réglementation sur la conception et sur les performances de ces systèmes, à la charge attentionnelle nécessaire qui en découle, l'enregistrement des données de comportement et d'actions du conducteur ou des systèmes doit être complet, suivant une périodicité suffisante, voire redondant, et suffisamment sécurisé pour éviter des données manquantes.

Comme indiqué précédemment, l'EDR du véhicule accidenté comporte une mesure de l'enfoncement de la pédale d'accélérateur à 86,8 %, les autres étant égales à 100 %. L'EDR a recueilli ces données à la fréquence 10 Hz depuis le premier choc qui est estimé au moment du heurt du véhicule avec un poteau. Cette donnée importante a été utilisée pour comprendre qu'il n'y a pas eu a priori de problème technique ayant conduit à une accélération subite et imprévue.

Cette valeur de 86,8 % d'enfoncement de l'accélérateur enregistrée dans l'EDR ne figure pas dans le log puisque la fréquence d'enregistrement est de 1 Hz.

D'autre part, bien qu'un tableau ait été transmis avec la définition des paramètres et leur fréquence d'enregistrement, on a pu constater que certaines données d'enfoncement de la pédale d'accélérateur, ainsi que celles maximales au cours de la période précédente, sont manquantes.

Le principe d'un enregistrement sur changement est adapté pour mesurer l'état de fonctionnement d'un système, mais pour des données devant pouvoir caractériser de manière adéquate les performances et les comportements du conducteur et du véhicule avant et pendant un accident, comme le souligne le NTSB, aucune d'entre elles ne peut être manquante, en particulier celles concernant le système de propulsion.

Les systèmes d'enregistrement autres que l'EDR du règlement UNECE ne sont pas réglementés. A minima, les enregistrements doivent respecter les fréquences assignées pour éviter tout doute sur leur qualité et donc sur le fonctionnement global du véhicule, car comme l'indique Tesla, le conducteur reste responsable à tout moment, y compris lorsque des systèmes interagissent sur les commandes du véhicule avec le conducteur.

Ces remarques relatives aux paramètres d'enregistrement des données d'action du conducteur et de fonctionnement du véhicule concernent les véhicules de tous les constructeurs, et pourraient éventuellement faire l'objet d'une réglementation spécifique. Toutefois, ces procédures d'enregistrement de données rencontrées dans cette enquête semblent être particulières à Tesla, le BEA-TT n'en ayant pas rencontré de semblables jusqu'à présent. En conséquence, le BEA-TT recommande :

Recommandation R2 adressée à Tesla :

Assurer un enregistrement effectif et complet des données des paramètres suivant leur périodicité ; pour ceux à valeur continue, fixer la fréquence à 10 Hz.

5.2 - Fonctionnement et interface homme-machine de l'AEBS

La raison ayant conduit l'activation du freinage automatique par l'AEBS n'est pas connue du BEA-TT. Pour rappel, un avertissement de risque de collision a été émis au moment de l'activation du freinage automatique d'urgence. Au vu des différentes images, tant de la caméra avant que de la caméra de vidéosurveillance de la préfecture de Police, ainsi que de la vitesse du véhicule à ce moment-là, il semble qu'il s'agisse d'une réaction intempestive du système.

Pourtant, les tests de détection de l'AEBS d'un véhicule du type accidenté réalisés par l'EuroNCAP[23] montrent de très bonnes performances (cf. annexe 2).

5.2.1 - Performances et limites des AEBS

Pour apprécier les limites de fonctionnement de certains systèmes et équipements à bord des véhicules, l'organisme EuroNCAP réalise, en particulier, des tests de performance d'AEBS présents sur divers véhicules légers, dans une plage de vitesse de 10 km/h à 80 km/h, et avec des véhicules cibles stationnaires, en circulation à vitesse constante ou en décélération. Les tests réalisés par Euro NCAP intègrent donc des vitesses supérieures à la vitesse de l'essai réglementaire, et des scénarios plus nombreux que ceux prévus par la réglementation. Ainsi les performances des systèmes sont testées avec des scénarios où l'axe du véhicule d'essai n'est pas aligné avec le centre du véhicule cible circulant dans le même sens, ou en face à face en ligne droite, ou pendant lequel le véhicule d'essai effectue une giration en travers de la trajectoire d'un véhicule en approche.

La notation utilisée est une note de sécurité globale basée sur l'évaluation dans quatre domaines : protection des occupants, protection des jeunes passagers, protection des usagers vulnérables de la route, aide à la conduite et d'évitement d'accident. Pour chaque domaine, un pourcentage synthétise les résultats des différents tests réalisés.

EuroNCAP indique avoir créé le système de notation de sécurité à cinq étoiles pour permettre aux consommateurs, à leur famille et aux sociétés de comparer plus aisément les véhicules et pour les aider à faire le choix le plus sûr en fonction de leurs besoins. La notation de sécurité est déterminée selon une série de tests qui ont été conçus et réalisés par EuroNCAP. Ces tests constituent, de manière simplifiée, des scénarios d'accidents de la vie réelle qui pourraient blesser ou tuer les occupants d'un véhicule ou d'autres usagers de la route. Toutefois EuroNCAP indique qu'une notation de sécurité ne peut jamais refléter complètement la complexité du monde réel.

Cet organisme a montré par certains essais que les systèmes Tesla pouvaient réagir dans des situations particulières, au-delà de ce qui est réglementairement imposé. Toutefois, ces essais restent éloignés de la réalité, car les essais sont menés dans un environnement épuré et dans de bonnes conditions météorologiques.

Le BEA-TT remarque que EuroNCAP ne réalise que des tests de performance de détection et de réaction, alors que le règlement n° 152 prévoit également des spécifications pour réduire les réactions intempestives sans réels dangers.

Sur des scénarios de tests conçus à partir de ceux d'EuroNCAP, le Bureau autrichien de la sécurité routière (KFV) et le Bureau suisse de prévention des accidents (BFU) ont mené une étude[24] sur les systèmes de freinage d'urgence automatique de différents types et générations de véhicules, avec pour but d'en apprécier le fonctionnement dans des scénarios de test en intégrant, à la différence d'EuroNCAP, des conditions météorologiques et des conditions de lumière différentes (pluie, brouillard, jour, nuit).

D'une manière générale et sans surprise, les tests ont montré que les systèmes de freinage d'urgence automatique fonctionnent d'autant moins bien que les conditions de test sont plus complexes, et qu'ils ont été les plus efficaces de jour et par temps clair. Par mauvais temps et dans des conditions de lumière défavorables, ils se sont révélés moins fiables.

---

23 EuroNCAP : European New Car Assessment Program, organisme international indépendant créé en 1997 qui a pour fonction principale d'effectuer des essais, notamment de choc, afin de tester la sécurité des véhicules.

24 Fiabilité des assistants de freinage d'urgence pour protéger les usagers de la route - 2021

5.2.2 - Signaux émis à destination du conducteur

L'activation de l'AEBS s'est accompagnée d'un signal sonore bref, entendu uniquement par une passagère, et possiblement par un affichage sur l'écran, mais celui-ci n'a pas été vu. Le signal émis qui correspond à l'avertissement d'un risque de collision imminente, a été stoppé par une action du conducteur sur la pédale de l'accélérateur, comme le prévoit Tesla.

Le règlement n° 152 relatif à l'AEBS spécifie que le conducteur doit pouvoir interrompre l'avertissement de risque de choc, et le freinage d'urgence, par toute action directe (rétrogradage forcé, action sur la commande du feu indicateur de direction, etc.) indiquant que le conducteur est conscient de la situation d'urgence.

L'action du conducteur au vu des données du fichier log a effectivement annulé à la fois les signaux d'avertissement mais également le freinage d'urgence. Cependant il n'en a pas eu conscience.

Concernant les messages et signaux qui peuvent être échangés entre le véhicule et le conducteur au travers de l'interface homme-machine, on peut citer en particulier le document de la NHTSA[25] dont le but est d'expliciter des lignes directrices, *« based on the best-available research and established Human Factors concepts »,* pour la conception de tels équipements qui, bien que n'étant pas d'application obligatoire, doivent permettre au conducteur d'avoir accès rapidement et aisément aux informations nécessaires à sa conduite, ce qui sous-tend qu'il doit les comprendre.

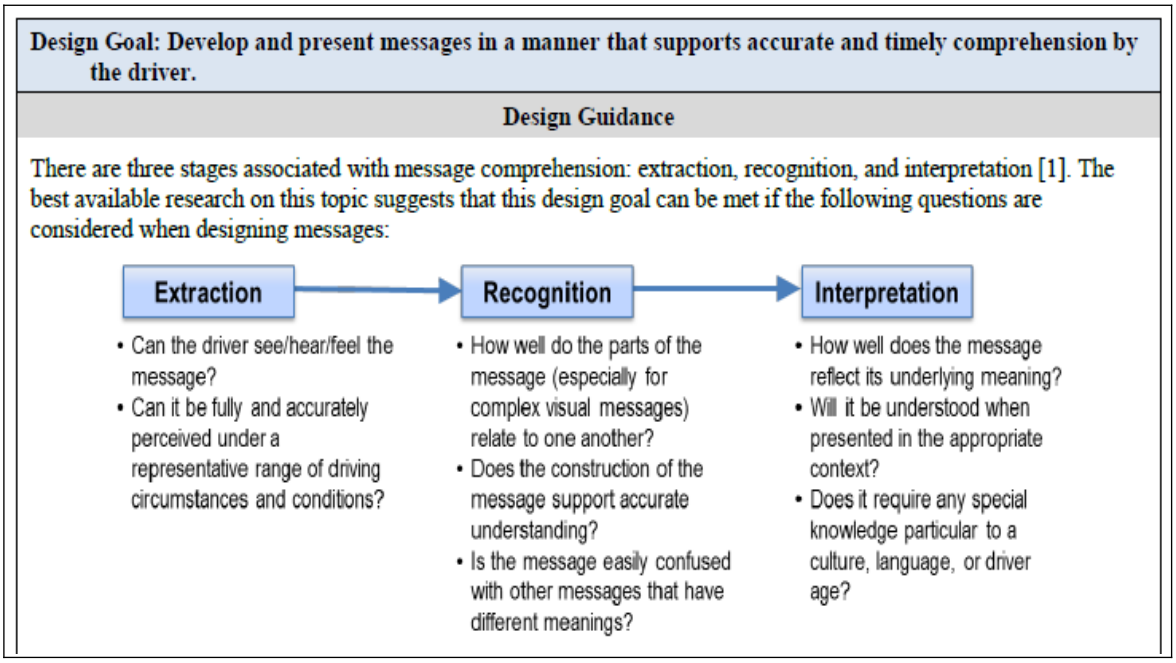


Figure 47 : lignes directrices en lien avec la compréhension des messages *(source NHTSA)*

Dans le cadre du processus de compréhension d'un message décrit par la figure 47, on peut s'apercevoir que la première phase, liée à la perception du signal, n'a pas été satisfaite dès le premier point : le conducteur n'a pas vu ni entendu les messages.

25 NHTSA – Human factors design guidance for driver-vehicle interfaces – DOT HS 812 360 - 2016

Suivant une autre approche développée par (Sheridan & Parasuraman, 2005)[26], les fonctions réalisées par un système automatisé peuvent correspondre à la fois :

1. à la mécanisation et l'intégration de la détection des variables environnementales par des capteurs artificiels ;
2. au traitement des données et à la prise de décision par le système automatisé ;
3. à l'action mécanique (par des moteurs ou des dispositifs qui exercent une force sur l'environnement) et/ou ;
4. à la communication d'informations traitées à l'opérateur humain.

L'AEBS est un système automatisé qui réalise l'ensemble de ces fonctions. La dernière correspond à l'interface homme-machine et à la qualité de l'information transmise. Les autres fonctions correspondent au processus de prise d'information, de traitement de l'information et d'action qui sont réalisées par tout conducteur dans sa tâche de conduite. Schématiquement, ce processus peut être résumé[27] par détecter, identifier, décider, agir.

Le fait pour le conducteur de ne pas avoir détecté, ou perçu, l'activation de l'AEBS a fait qu'il s'est retrouvé « hors de la boucle » de l'action de l'AEBS qui a agi sur des commandes du véhicule. Ce principe est évoqué par (Endsley et Kaber, 1999)[28] et signifie que le conducteur n'était plus au fait de l'état de la situation, alors qu'il devait reprendre le contrôle du véhicule après une action de l'AEBS qu'il ne maîtrisait pas puisqu'il s'agit d'une action automatique.

Dès lors, l'action d'appui sur la pédale d'accélérateur, en dehors d'une action consciente destinée à interrompre le freinage automatique, avait une forte probabilité d'être inadaptée.

Cette situation découle de la possibilité qu'a le conducteur d'annuler l'avertissement et le freinage d'urgence à n'importe quel moment. Concernant l'accident, une seule action du conducteur a suffi pour interrompre simultanément l'avertissement et le freinage automatique, car les signaux d'avertissement ont été émis, comme le prévoit le règlement n° 152, au plus tard à l'activation de ce dernier.

On peut dès lors s'interroger s'il y a intérêt à maintenir la possibilité pour le conducteur d'interrompre l'activation d'un AEBS dans la phase de déclenchement du freinage automatique. Sans cette option, le véhicule se serait arrêté, et le conducteur aurait été maintenu dans la boucle.

En effet, comme précisé dans le règlement n° 152, le freinage automatique ne doit se déclencher que s'il y a un risque d'une collision imminente. Or par essence, les AEBS sont plus rapides que les conducteurs pour engager une action de freinage, du fait du temps physiologique nécessaire à tout conducteur pour réaliser le processus détecter, identifier, décider, agir, dont la durée est proche, voire légèrement supérieure à 1 s[29].

On peut de même s'interroger sur la pertinence d'utiliser l'accélérateur comme moyen adapté pour interrompre l'activation de l'AEBS, puisque, dans le fonctionnement attendu de cette aide, un obstacle a été détecté et risque d'être heurté dans la fraction de seconde qui suit. Il est préférable de maintenir des moyens d'interrompre l'activation d'un AEBS par des actions de conduite dont l'objectif est d'éviter un choc, comme un freinage ou un braquage, possibilités déjà prévues sur ce véhicule par Tesla (cf. § 3.3.3.7).

26 Sheridan, T. B., & Parasuraman, R. (2005). Human-Automation Interaction. Reviews of Human Factors and Ergonomics

27 Sécurité des routes et des rues - CETUR - 1992

28 Endsley, M. R., & Kaber, E. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, *42*(3), 462–492

29 Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes - Cerema - 2006

Certes, dans le cadre de l'accident, le freinage d'urgence n'avait pas de raison d'être maintenu, car a priori il n'y avait pas d'obstacle. Mais dans ce cas, il s'agit d'un problème de réaction intempestive, donc de sûreté de fonctionnement, probablement à l'origine de l'activation de l'AEBS de la Tesla, et le conducteur ne peut parer cette réaction car il ne s'attend pas à un tel comportement. Pour rappel, les avertissements sonore et visuel ont été émis en même temps que l'activation du freinage.

Un essai de réaction intempestive est prévu dans l'annexe 3 du règlement n° 152, et à la date d'homologation de la voiture Tesla, il comportait un passage du véhicule testé entre deux véhicules à l'arrêt espacés de 4,5 m et alignés sur l'arrière. Le système AEBS testé ne doit ni déclencher d'avertissement de risque de choc ni amorcer la phase de freinage d'urgence. Ces conditions apparaissent plus favorables que celles rencontrées le jour de l'accident, où la largeur de la voie réservée pour la circulation des véhicules routiers était de 4 m.

En conséquence, le BEA-TT recommande :

Recommandation R3 adressée à Tesla :

Ne pas rendre possible l'annulation de l'activation de l'AEBS par un appui sur l'accélérateur.

Recommandation R4 adressée à la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) :

Proposer au groupe de travail ad hoc de l'UNECE une modification du règlement n°152 visant à retirer la possibilité pour le conducteur d'interrompre un freinage automatique d'urgence de l'AEBS.

5.3 - Absence de réactions du conducteur

Comme l'indique le témoignage du conducteur, il estime que la voiture a roulé sur une vingtaine de mètres à vitesse qu'il considère comme normale puis brusquement a accéléré fortement, pendant 20 s. Comme décrit dans les investigations, l'hypothèse privilégiée est que le conducteur a maintenu un enfoncement de l'accélérateur, majoritairement à 100 %, pendant toute cette durée.

Richard A. Schmidt dans l'examen des contributions des facteurs humains dans les cas d'accélération involontaire[30] met en avant deux erreurs dans le positionnement du pied :

- l'erreur consécutive à un choix incorrect entre deux ou plusieurs possibilités ;
- et l'erreur dans l'exécution de la réponse.

Dans le premier cas, l'auteur souligne que l'erreur est généralement détectée et corrigée rapidement. Dans le second, c'est faire le bon choix, en l'occurrence vouloir appuyer sur la pédale de frein, mais l'erreur se trouve dans l'exécution de celle-ci. L'auteur prend comme exemple le lancer de balle au basket-ball. Le choix conscient de ce qu'il faut faire, marquer un panier, est constant d'une tentative à une autre, mais même les joueurs les plus expérimentés produisent des tentatives qui varient d'un essai à un autre. Ainsi la production du mouvement est la principale source d'imprécision.

De nombreux facteurs peuvent intervenir dans cette erreur. Un en particulier, appelé **transfert négatif,** est défini comme **la diminution de la performance d'une tâche à la suite de la pratique ou de l'expérience d'une autre tâche.**

30 Unintended Acceleration: A Review of Human Factors Contributions HUMAN FACTORS, 1989,31(3),345-364

Ce qui différencie un véhicule thermique à transmission automatique d'un véhicule électrique est le freinage à récupération. L'efficacité de ce freinage associé à la pédale d'accélérateur amène le conducteur, en particulier en agglomération où les vitesses de circulation sont faibles, à n'utiliser que cette pédale pour la conduite, d'autant que le mode « Hold » arrêtera le véhicule automatiquement sans un appui sur la pédale de frein. De fait, cela entraîne une diminution de l'usage de la pédale de frein, et potentiellement un transfert négatif.

À l'inverse, dans le cas d'un freinage à récupération installé sur la pédale de frein, dit alors de catégorie B (cf. § 3.3.2), l'usage de cette pédale n'en sera pas diminué, et la récupération d'énergie est assurée.

Le BEA-TT n'a pas d'explication évidente sur le mauvais positionnement du pied du conducteur, et par manque d'étude et de données, ne peut que supposer que le freinage à récupération installé sur l'accélérateur, comme cela est le cas sur la voiture accidentée, peut potentiellement agir sur le comportement de certains conducteurs, par une diminution de la performance de l'utilisation de la pédale du frein de service. Le BEA-TT émet cette hypothèse dans le cadre de l'accident, qui s'est manifesté par un mauvais positionnement du pied.

Par la suite, pour essayer d'éclairer le fait que le conducteur ne s'aperçoit pas de son erreur de positionnement du pied, R. Schmidt souligne que peu ou pas d'attention est dirigée vers l'exécution du mouvement lui-même, en particulier s'il est rapide, prévisible dans l'environnement et bien pratiqué. Une fois que le mouvement est initié, l'attention est dirigée vers d'autres sources de stimulation qui deviendront bientôt plus pertinentes, telles que l'environnement de circulation, la planification et l'exécution des mouvements des membres pour la direction. L'attention est alors détournée du retour d'information provenant du pied, ce qui rend plus probable le fait que le conducteur ne détecte pas que son pied est sur la mauvaise pédale.

Dans les cas où la voiture accélère de façon inattendue, la sensation du véhicule en mouvement pourrait être suffisamment intense pour que l'attention soit attirée vers le guidage et non vers le pied.

Enfin, pour expliquer la persistance de l'erreur, l'auteur indique qu'il est très probable que le conducteur était alors dans une position d'hypervigilance, connue sous le terme de panique (Janis et Mann 1977). Selon l'analyse de ces auteurs, la réaction à une menace extrême est une réaction de panique caractérisée par une attention aveugle à toutes sortes d'indice de menaces, mineures et majeures, alors que la personne cherche frénétiquement un moyen d'éviter les dangers anticipés.

Cet état d'hypervigilance s'accompagne parfois d'un gel de la personne, qui semble ne pouvoir prendre aucune mesure en réaction. De plus, elle souffre d'une perte de capacité de mémoire immédiate, ce qui permet d'expliquer le fait que le conducteur n'ait que des souvenirs vagues des évènements liés à l'accident.

L'auteur résume ainsi la situation. L'accélération surprend le conducteur, elle met sa vie en danger et le temps pour trouver une solution est court. Dans de telles conditions, les activités de traitement de l'information sont gravement perturbées, le conducteur est distrait par une grande variété d'évènements dans l'environnement immédiat, aucune mesure efficace n'est prise avant l'accident. La solution de retirer le pied du frein n'est pas tentée, peut-être parce que le conducteur sait que le pied est sur le frein. L'impression subjective est que les freins ont lâché et que la voiture n'est plus sous le contrôle du conducteur, ce qui rajoute du stress. Dans cet état, d'autres solutions ne sont même pas tentées.

Cette analyse semble en tout point expliquer le comportement du conducteur, y compris le heurt du cycliste.

Pour diminuer l'occurrence de tels évènements tragiques, il est important que le conducteur ait pleinement conscience des capacités de la voiture en termes d'accélération et des limites des systèmes. Ce point est souligné dans le rapport des experts du CNSR sur les aides à la conduite (cf. § 5.1.1), dont un des risques identifiés est relatif à la connaissance qu'ont les conducteurs des performances et des limites des systèmes. D'ailleurs le conducteur a témoigné qu'à l'achat de son véhicule, il n'avait suivi aucune formation sur le véhicule, et que Tesla n'en proposait pas.

En conséquence, le BEA-TT recommande :

Recommandation R5 adressée à Tesla :

Envisager la diffusion d'informations complémentaires à celles déjà présentes dans le manuel du constructeur sur les capacités d'accélération du véhicule et sur le fonctionnement, les performances et les limites, des principales aides à la conduite ayant une action sur les commandes du véhicule.

6 - Conclusions et recommandations

Recommandation R1 adressée à la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) :

Proposer dans les instances UNECE une augmentation de la durée et de la fréquence d'enregistrement des données d'évènement, ainsi qu'une extension des plages minimales d'enregistrement précédant un choc ;

Proposer d'intégrer en plus des systèmes dits de sécurité conformément au règlement UE 2019/2144, des paramètres des systèmes pouvant avoir une action sur les organes de contrôles du véhicule.

Recommandation R2 adressée à Tesla :

Assurer un enregistrement effectif et complet des données des paramètres suivant leur périodicité ; pour ceux à valeur continue, fixer la fréquence à 10 Hz.

Recommandation R3 adressée à Tesla :

Ne pas rendre possible l'annulation de l'activation de l'AEBS par un appui sur l'accélérateur.

Recommandation R4 adressée à la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) :

Proposer au groupe de travail ad hoc de l'UNECE une modification du règlement n°152 visant à retirer la possibilité pour le conducteur d'interrompre un freinage automatique d'urgence de l'AEBS.

Recommandation R5 adressée à Tesla :

Envisager la diffusion d'informations complémentaires à celles déjà présentes dans le manuel du constructeur sur les capacités d'accélération du véhicule et sur le fonctionnement, les performances et les limites, des principales aides à la conduite ayant une action sur les commandes du véhicule.

ANNEXES

Annexe 1 : décision d’ouverture d’enquête

Annexe 2 : fiche EuroNCAP -Extraits

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

BEATT
Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre

Le Directeur

La Défense, le 17 décembre 2021

DECISION

Le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre,

Vu le Code des transports et notamment les articles L. 1621-1 à L. 1622-2 et R. 1621-1 à R. 1621-26 relatifs, en particulier, à l'enquête technique après un accident ou un incident de transport terrestre ;

Vu les circonstances de l'accident impliquant un taxi électrique équipé d'aides à la conduite au carrefour de la rue de Tolbiac et des avenues d'Ivry et de Choisy sur la commune de Paris (13e) survenu le 11 décembre 2021 ;

décide

Article 1 : Une enquête technique est ouverte en application des articles L. 1621-1 et R. 1621-22 du Code des transports concernant l'accident impliquant un taxi électrique équipé d'un système d'assistance à la conduite au carrefour de la rue de Tolbiac et des avenues d'Ivry et de Choisy sur la commune de Paris (13e) survenu le 11 décembre 2021.

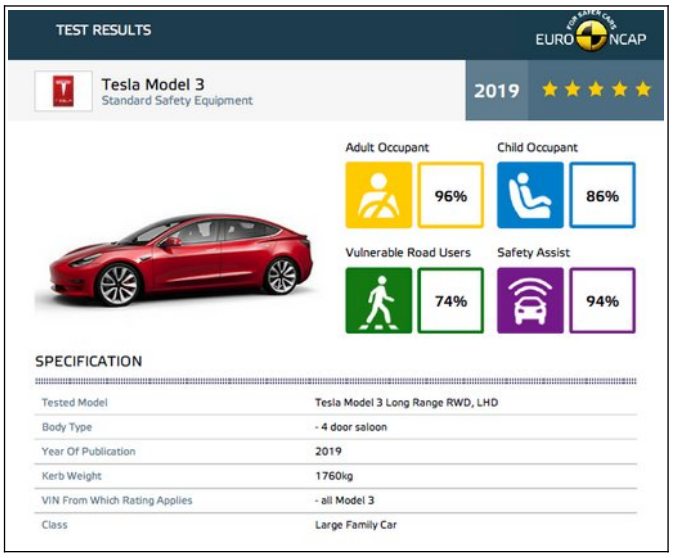
Marie-Thérèse GOUX

La Secrétaire Générale
du Bureau d'Enquêtes sur
les Accidents de Transport Terrestre

Pi Goux

Jean-Damien PONCET

Annexe 2 : Fiche EuroNcap du véhicule Tesla modèle 3 -Extraits



TEST RESULTS

EURO NCAP

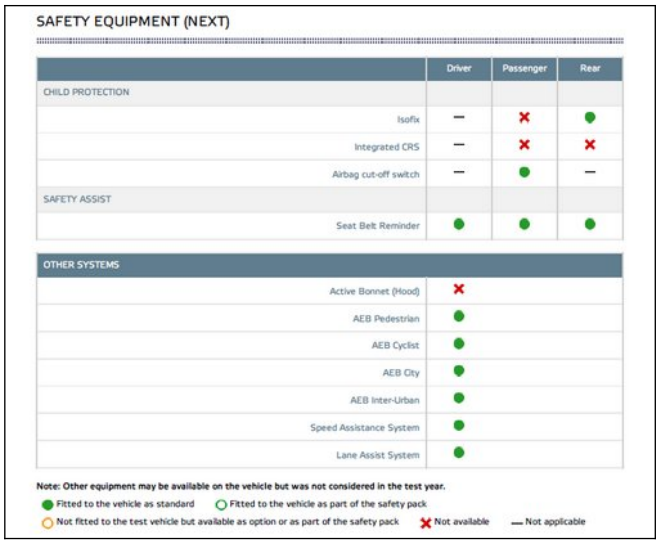
Tesla Model 3
Standard Safety Equipment

2019 ★★★★★

Adult Occupant	96%
Child Occupant	86%
Vulnerable Road Users	74%
Safety Assist	94%

SPECIFICATION

Tested Model	Tesla Model 3 Long Range RWD, LHD
Body Type	- 4 door saloon
Year Of Publication	2019
Kerb Weight	1760kg
VIN From Which Rating Applies	- all Model 3
Class	Large Family Car



SAFETY EQUIPMENT (NEXT)

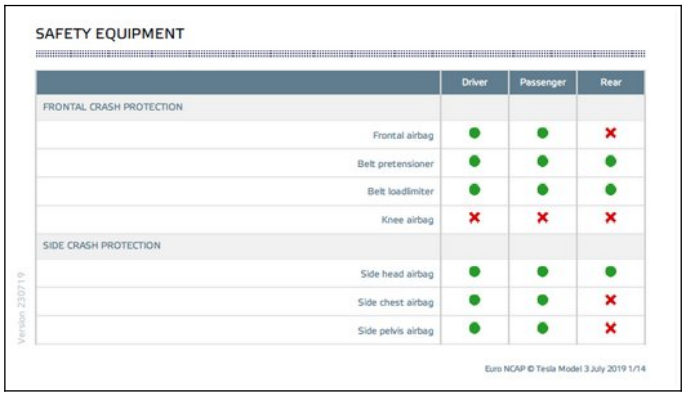
	Driver	Passenger	Rear
CHILD PROTECTION			
Isofix	–	✗	●
Integrated CRS	–	✗	✗
Airbag cut-off switch	–	●	–
SAFETY ASSIST			
Seat Belt Reminder	●	●	●

OTHER SYSTEMS	
Active Bonnet (Hood)	✗
AEB Pedestrian	●
AEB Cyclist	●
AEB City	●
AEB Inter-Urban	●
Speed Assistance System	●
Lane Assist System	●

Note: Other equipment may be available on the vehicle but was not considered in the test year.

● Fitted to the vehicle as standard ○ Fitted to the vehicle as part of the safety pack

○ Not fitted to the test vehicle but available as option or as part of the safety pack ✗ Not available – Not applicable

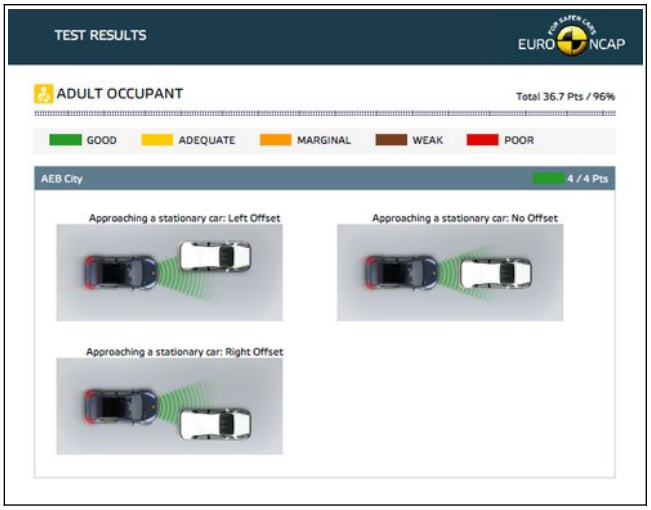


SAFETY EQUIPMENT

	Driver	Passenger	Rear
FRONTAL CRASH PROTECTION			
Frontal airbag	●	●	✗
Belt pretensioner	●	●	●
Belt loadlimiter	●	●	●
Knee airbag	✗	✗	✗
SIDE CRASH PROTECTION			
Side head airbag	●	●	●
Side chest airbag	●	●	✗
Side pelvis airbag	●	●	✗

Version 230719

Euro NCAP © Tesla Model 3 July 2019 1/14



TEST RESULTS

EURO NCAP

ADULT OCCUPANT Total 36.7 Pts / 96%

GOOD ADEQUATE MARGINAL WEAK POOR

AEB City 4 / 4 Pts

Approaching a stationary car: Left Offset

Approaching a stationary car: No Offset

Approaching a stationary car: Right Offset

VULNERABLE ROAD USERS Total 35.7 Pts / 74%

AEB Pedestrian

Day time

Adult crossing the road

Child running from behind parked vehicles

Adult along the roadside

Night time

Adult crossing the road

Adult along the roadside

AEB Cyclist

Cyclist crossing

Cyclist along the roadside

Version 230719

Euro NCAP © Tesla Model 3 July 2019 10/14

TEST RESULTS

EURO NCAP

Règlement général de protection des données

Le bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) est investi d'une mission de service public dont la finalité est la réalisation de rapports sur les accidents afin d'améliorer la sécurité des transports terrestres (articles L. 1621-1 et 1621-2 du code des transports, voir la page de présentation de l'organisme).

Pour remplir cette mission, les personnes chargées de l'enquête, agents du BEA-TT habilités ainsi que d'éventuels enquêteurs extérieurs spécialement commissionnés, peuvent rencontrer toute personne impliquée dans un accident de transport terrestre (articles L. 1621-14) et recueillir toute donnée utile.

Ils traitent alors les données recueillies dans le cadre de l'enquête dont ils ont la responsabilité uniquement pour la seule finalité prédéfinie en garantissant la confidentialité des données à caractère personnel. Les rapports d'enquêtes sont publiés sans le nom des personnes et ne font état que des informations nécessaires à la détermination des circonstances et des causes de l'accident. Les données personnelles sont conservées pour une durée de 4 années à compter de la publication du rapport d'enquête, elles sont ensuite détruites.

Le traitement « Enquête accident BEA-TT » est mis en œuvre sous la responsabilité du BEA-TT relevant du ministère des transports. Le ministère s'engage à ce que les traitements de données à caractère personnel dont il est le responsable de traitement soient mis en œuvre conformément au règlement (UE) 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données (ci-après, « *règlement général sur la protection des données* » ou RGPD) et à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

Les personnes concernées par le traitement, conformément à la législation en vigueur, peuvent exercer leurs droits auprès du responsable de traitement : **droit d'accès aux données, droit de rectification, droit à la limitation, droit d'opposition.**

Pour toute information ou exercice de vos droits, vous pouvez contacter :

1- Le responsable de traitement, qui peut être contacté à l'adresse suivante :

- à l'adresse : **bea-tt@developpement-durable.gouv.fr**
- ou par courrier (avec copie de votre pièce d'identité en cas d'exercice de vos droits) à l'adresse suivante :

Ministère des transports
À l'attention du directeur du BEA-TT
Grande Arche - Paroi Sud, 29e étage, 92055 LA DEFENSE Cedex

2- Le délégué à la protection des données (DPD) du ministère:

- à l'adresse suivante **: ajag2.daj.sg@developpement-durable.gouv.fr** ;
- ou par courrier (avec copie de votre pièce d'identité en cas d'exercice de vos droits) à l'adresse suivante :

Ministère des transports
À l'attention du Délégué à la protection des données
SG/DAJ/AJAG2
92055 La Défense cedex

Vous avez également la possibilité d'adresser une réclamation relative aux traitements mis en œuvre à la Commission nationale informatique et libertés.
(3 Place de Fontenoy - TSA 80715 - 75334 PARIS CEDEX 07)

Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre

Grande Arche - Paroi Sud
92055 La Défense cedex
Téléphone : 01 40 81 21 83
bea-tt@developpement-durable.gouv.fr
www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr