



L2.5.A Synthèse des situations accidentogènes : incidents et scénarios critiques

Work Package	2
Responsable du WP, affiliation	LEDOUX V. CEREMA
Livrable n°	L2.5.a
Version	V4
Auteur responsable du livrable	SERRE T. UGE
Auteurs, affiliations	LEDOUX V. CEREMA SAINT-PIERRE G., CEREMA SERRE T. UGE TATTEGRAIN H. UGE
Selecteurs, affiliations	MIGNOT D.
Statut du livrable	Final

Veuillez citer ce document de cette façon :

Ledoux V., Saint-Pierre G., Serre, T., Tattegrain, H., (2022), Livrable L2.5 Synthèse des situations accidentogènes : incidents et scénarios critiques, Projet SURCA, financé par la FSR, 32p.

Historique des versions

Version	Date	Auteurs	Type des changements
V0	11/12/2019	Tattegrain H.	Plan et partie méthode scenario critique
V0.a	12/12/2019	Tattegrain H	Mise à jour des formats des légendes et des références bibliographiques
V1		Ledoux V. Saint-Pierre G.	Ajout partie Incidents
V2	2022	Tattegrain H. Ledoux V.	Relecture finale

Remerciements

Le Projet SURCA est financé par la dévolution de la Fondation Sécurité Routière, la Délégation à la sécurité routière et pour moitié par les partenaires du projet.

RESUME

L'objectif de ce livrable est double. Il s'agit, d'une part, de proposer un panorama de la notion d'incidents, et d'autre part, de décrire une méthode permettant d'appréhender les conséquences de l'introduction des véhicules automatisés en termes d'apparition de scénarios critiques.

La sécurité routière repose historiquement sur l'analyse des accidents corporels pour évaluer les risques et orienter les politiques publiques. Cet indicateur, largement mobilisé dans les bilans d'accidentalité, présente toutefois des limites notables : il ne couvre ni les accidents matériels ni ceux survenus en dehors du réseau routier ouvert à la circulation, et il sous-estime de manière significative le nombre réel de blessés. De surcroît, la diminution tendancielle du nombre d'accidents rend leur étude de plus en plus délicate, notamment à des échelles spatiales fines.

Dans ce contexte, l'identification d'événements critiques de conduite, appelés incidents, suscite un intérêt croissant. Ces situations, bien qu'elles ne débouchent pas nécessairement sur un accident, peuvent constituer des signaux précoce de danger et offrir des données plus abondantes et accessibles que les seuls fichiers d'accidents. L'étude des incidents s'inscrit dans une approche préventive inspirée des théories pyramidales de la gestion des risques, selon lesquelles les accidents graves sont précédés d'un grand nombre d'événements mineurs ou évités de justesse.

Ainsi le chapitre 2 s'attache à explorer les différentes manières de définir, détecter et catégoriser ces incidents, en se focalisant sur les véhicules légers. Il s'agit d'un état des lieux des principaux concepts mobilisés et des méthodes utilisées, qu'il s'agisse d'approches fondées sur les mesures dynamiques, les marges de sécurité, les alertes issues des aides à la conduite ou encore l'analyse des comportements. Sans prétendre à l'exhaustivité, ce panorama vise à éclairer la manière dont les incidents peuvent contribuer au renouvellement des outils d'analyse en sécurité routière.

La partie 3 de ce document décrit une méthodologie d'identification des scénarios de circulation les plus critiques pour les véhicules autonomes. Son objectif n'est pas de tester les performances techniques des véhicules mais de définir dans quelles situations routières des événements plus ou moins fréquents mais bien réels peuvent entraîner des situations critiques que l'automatisation devra impérativement être en mesure de gérer.

Table des matières

1	INTRODUCTION	6
2	LES INCIDENTS	7
2.1	LA NOTION D'INCIDENTS	7
2.1.1	La détection d'incidents basée sur le dépassement de seuils dynamiques	8
2.1.2	La détection d'incidents basée sur des marges de sécurité réduites	10
2.1.3	Les incidents basés sur les aides à la conduite	10
2.1.4	Les incidents basés sur le comportement des conducteurs.....	11
2.1.5	Incidents déclarés par le conducteur	11
2.1.6	Incidents identifiés par la visualisation de vidéos	11
2.2	LES DISPOSITIFS DE RECUEIL	12
2.2.1	Les systèmes embarqués.....	12
2.2.2	Les systèmes bord de voie.....	13
2.3	LIEN ENTRE INCIDENTS ET ACCIDENTS	14
3	SCENARIOS CRITIQUES.....	15
3.1	MÉTHODOLOGIE POUR IDENTIFIER LES SCENARIOS LES PLUS CRITIQUES POUR LES VÉHICULES AUTONOMES	15
3.2	MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODOLOGIE	17
3.2.1	Sélection du cas d'usage.....	17
3.2.2	Définition des situations de conduite.....	17
3.2.3	Définition des événements.....	18
3.2.4	Définition de la contrôlabilité des événements génériques dans chaque situation	20
3.2.5	Définition de la sévérité des événements génériques dans chaque situation	22
3.2.6	Calcul de la criticité pour chaque événement en fonction de sa fréquence et des sévérités et des contrôlabilités de toutes ses dimensions génériques	23
3.2.7	Calcul de la matrice récapitulative des criticités de tous les événements et sélection des scénarios les plus critiques	24
3.3	ANALYSE DE LA MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE	26
4	CONCLUSION	29
5	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	30

Table des tableaux

Tableau n° 1 : Seuils de détection d'incidents.....	9
Tableau n° 2 : Critères de déclenchement relatifs au risque de collision	10
Tableau n° 3 : Combinaison des situations sélectionnées dans le rapport.....	17
Tableau n° 4 : Définition du trafic.....	18
Tableau n° 5 : Définition de l'ISO pour la fréquence	20
Tableau n° 6 : Définition de l'ISO pour la contrôlabilité.....	21
Tableau n° 7 : Cotation de la contrôlabilité.....	21
Tableau n° 8 : Définition de l'ISO pour la sévérité.....	22
Tableau n° 9 : Cotation de la sévérité.....	22
Tableau n° 10 : Matrice ISO 26262 de calcul de criticité en fonction de la Fréquence, contrôlabilité et sévérité.....	23
Tableau n° 11 : Cotation de la criticité	23
Tableau n° 12 : Extrait d'une matrice pour le cas d 'usage « véhicule particulier sur autoroute »	24

Table des figures

Figure n° 1 : Pyramide des accidents/risques.....	7
Figure n° 2 : Seuil de déclenchement sur la vitesse de lacet	9
Figure n° 3 : Schéma d'un système d'acquisition de données (Antin et al., 2019)	12
Figure n° 4 : Synoptique de la méthodologie	16
Figure n° 5 : Identification des scénarios critiques de niveau 5	26
Figure n° 6 : Identification des scénarios critiques de niveau 4	26
Figure n° 7 : Identification des scénarios critiques en fonction du trafic.....	27

1 INTRODUCTION

L'objectif de ce livrable est double. Il s'agit, d'une part, de proposer un panorama de la notion d'incidents, et d'autre part, de décrire une méthode permettant d'appréhender les conséquences de l'introduction des véhicules automatisés en termes d'apparition de scénarios critiques.

La sécurité routière repose historiquement sur l'analyse des accidents corporels pour évaluer les risques et orienter les politiques publiques. Cet indicateur, largement mobilisé dans les bilans d'accidentalité, présente toutefois des limites notables : il ne couvre ni les accidents matériels ni ceux survenus en dehors du réseau routier ouvert à la circulation, et il sous-estime de manière significative le nombre réel de blessés. De surcroît, la diminution tendancielle du nombre d'accidents rend leur étude de plus en plus délicate, notamment à des échelles spatiales fines.

Dans ce contexte, l'identification d'événements critiques de conduite, appelés incidents, suscite un intérêt croissant. Ces situations, bien qu'elles ne débouchent pas nécessairement sur un accident, peuvent constituer des signaux précoce de danger et offrir des données plus abondantes et accessibles que les seuls fichiers d'accidents. L'étude des incidents s'inscrit dans une approche préventive inspirée des théories pyramidales de la gestion des risques, selon lesquelles les accidents graves sont précédés d'un grand nombre d'événements mineurs ou évités de justesse.

Ainsi le chapitre 2 s'attache à explorer les différentes manières de définir, détecter et catégoriser ces incidents, en se focalisant sur les véhicules légers. Il s'agit d'un état des lieux des principaux concepts mobilisés et des méthodes utilisées, qu'il s'agisse d'approches fondées sur les mesures dynamiques, les marges de sécurité, les alertes issues des aides à la conduite ou encore l'analyse des comportements. Sans prétendre à l'exhaustivité, ce panorama vise à éclairer la manière dont les incidents peuvent contribuer au renouvellement des outils d'analyse en sécurité routière.

L'intérêt croissant pour l'analyse des incidents trouve une résonance particulière dans le contexte de l'automatisation croissante de la conduite et dans l'identification de situations de conduite critique. Le déploiement des véhicules automatisés soulève une difficulté spécifique : définir des règles de sécurité pour un objet technologique encore en cours de conception, dans un contexte où le conducteur n'est plus systématiquement disponible pour gérer les différentes situations routières. Cette perspective inquiète les autorités publiques qui possèdent une connaissance fine de la multitude des événements qui peuvent se produire sur la voirie. Elles s'interrogent donc sur la capacité de cette technologie à gérer ces événements avec un niveau de fiabilité équivalent à celui d'un conducteur humain. Les chercheurs en sciences humaines pour leur part, disposent d'une compréhension approfondie tant des comportements des conducteurs actuels que des situations dans lesquelles ils peuvent rencontrer des difficultés. De leur côté les constructeurs automobiles sont pleinement conscients des limites technologiques actuelles de leurs véhicules et des performances qu'il est possible d'attendre des futurs véhicules autonomes.

Dans ce contexte, le chapitre 3 de ce document décrit une méthodologie d'identification des scénarios de circulation les plus critiques pour les véhicules autonomes. Son objectif n'est pas de tester les performances techniques des véhicules mais de définir dans quelles situations routières des événements plus ou moins fréquents mais bien réels peuvent entraîner des situations critiques que l'automatisation devra impérativement être en mesure de gérer.

2 LES INCIDENTS

Le nombre d'accidents corporels (un accident est considéré comme corporel lorsque au moins l'un des impliqués dans l'accident est légèrement blessé) est généralement utilisé pour faire état du niveau d'insécurité routière. Bien que cet indicateur offre un panorama d'ensemble de l'accidentalité au niveau national, il est soumis à un biais de représentativité et d'exhaustivité puisqu'il ne représente pas une vision globale de l'accidentologie :

- il ne tient pas compte des accidents matériels et de ceux qui sont intervenus sur une voie non ouverte à la circulation ;
- il sous-évalue l'enjeu en termes d'accidents corporels. Ainsi les travaux menés à l'aide du Registre du Rhône conduit à estimer que le nombre réel des blessés est au moins 4 fois supérieur à celui enregistré dans les fichiers BAAC (ONISR 2019)

De plus l'accident de la circulation routière est un évènement de plus en plus rare et sa survenue est de plus en plus diffuse sur le réseau routier. Il devient dès lors de plus en plus difficile d'utiliser ces seules données pour orienter les politiques de sécurité routière tant au niveau national que local.

Pouvoir suppléer les données d'accidentalité par des données disponibles en plus grand nombre apparaît alors comme une idée séduisante. L'approche consiste à recueillir des situations de conduite considérées comme dangereuses ou critiques mais n'ayant pas nécessairement dégénéré en accident corporel ou matériel. Ces événements sont alors considérés comme des incidents. De par leur plus grande probabilité d'occurrence, le recueil et l'étude de ces incidents apparaît comme un outil potentiellement pertinent pour améliorer les connaissances en accidentologie. Toutefois, pour que cette pertinence soit avérée, il est nécessaire qu'existe un lien entre accidents et incidents ou à minium entre incidents et risque accru d'accidents.

Comme nous le verrons par la suite, la notion d'incident (appliquée au domaine de la sécurité routière) englobe de nombreux concepts. Le présent chapitre n'entend pas livrer une vision exhaustive de l'état de l'art sur le sujet mais se limite à en présenter les grandes lignes directrices. Il est également circonscrit aux seuls véhicules légers.

2.1 La notion d'incidents

L'utilisation de la notion d'incidents découle de la « théorie » du pyramide des accidents/risques (Heinrich 1931, Bird 1966) qui exprime notamment le fait qu'il faut parfois peu de chose pour qu'un évènement/un comportement dangereux (mais bénin) se transforme en un accident aux conséquences plus ou moins graves. Il en résulte que pour prévenir les accidents, il convient d'agir sur la base de cette pyramide qui est constituée d'un effectif important d'évènements.

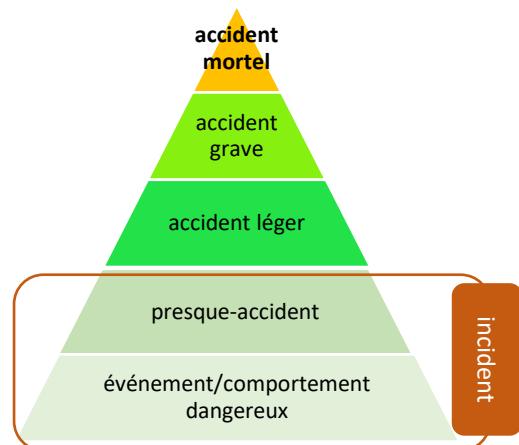


Figure n° 1 : Pyramide des accidents/risques

Appliqué au domaine de la sécurité routière, il s'agit donc d'identifier les situations de conduites critiques qui ne vont pas nécessairement dégénérer en accidents et qui constituent les **incidents**¹.

NOTE : Les termes presqu'accident ou quasi-accident sont parfois également utilisés pour désigner les incidents. En anglais ce sont les termes near-crash ou miss-crash qui sont généralement employés.

L'identification de ces situations de conduite nécessite de s'appuyer :

- Soit sur des grandeurs (physiques, physiologiques...) mesurables ou détectables associées à la définition de seuils dont le dépassement permet de qualifier la situation de conduite en tant qu'incident ;
- Soit sur un ressenti ou jugement humain rapporté par le conducteur (ou autre témoin de la scène).

Le premier cas requiert donc de disposer de grandeurs observables permettant de quantifier et/ou qualifier des attributs de la situation de conduite. Pour cela, il est possible de recourir soit à des systèmes d'acquisition, embarqués, ou installés dans des véhicules soit à des dispositifs bords de voie pour mettre en œuvre des techniques de conflit du trafic (cf. 0).

Le second cas nécessite que le conducteur dispose d'un moyen de signaler une situation de conduite qu'il a jugé dangereuse ou critique. Ce signalement s'effectue en temps réel (à l'aide d'un bouton spécifique par exemple) ou en différé (site web, carnet d'incidents). Ce type de relevé s'accompagne toujours du recueil de données issues de capteurs qui permettent, à minima, de contextualiser la situation de conduite au moment de l'incident.

Il n'existe pas de définition unique de ce qu'est un incident car il est difficile de caractériser ce qu'est une situation de conduite dangereuse. À ce jour, il s'agit surtout d'un concept que diverses expérimentations et recherches menées à travers le monde visent à mieux circonscrire. En conséquence, il existe quasiment autant de définitions de ce qu'est un incident que l'on dénombre d'expérimentations / démarches de recueils d'incidents. La définition d'un incident est donc intrinsèquement liée à une expérimentation et/ou une instrumentation donnée. Il est toutefois possible de catégoriser les incidents selon plusieurs grandes familles qui sont présentées ci-après.

2.1.1 La détection d'incidents basée sur le dépassement de seuils dynamiques

Les fondements de cette approche s'appuient sur le constat qu'en situation normale de conduite, les conducteurs sollicitent peu leur véhicule en termes de dynamiques (Lechner et Perrin, 1996). De fortes sollicitations dynamiques pourraient donc correspondre à des actions drastiques mises en œuvre par le conducteur pour faire face à une situation de conduite critique. Les incidents sont alors définis comme les instants où certaines métriques caractérisant la dynamique du véhicule dépassent des seuils donnés. Les accélérations longitudinales et/ou transversales (associées parfois à leurs dérivées) sont les grandeurs les plus fréquemment utilisées pour identifier ces sollicitations importantes.

Bien que présentant quelques différences, les seuils de détection retenus (en valeur absolue) se situent aux alentours de 6 m.s^{-2} ². Ces seuils sont parfois modulés en fonction de la vitesse de circulation ou de la catégorie de route circulée comme le montre quelques exemples dans le tableau ci-après.

¹

²

Tableau n° 1 : Seuils de détection d'incidents

Références	Seuils de détection des incidents
Mc Geehee et al. (2007) USA	<ul style="list-style-type: none"> • $acc_long \geq 5,0 \text{ m/s}^2$ • $acc_lat \geq 5,5 \text{ m/s}^2$
Naude et al. (2019) Projet Svrai France	<ul style="list-style-type: none"> • Si <i>vitesse</i> < 80 km/h et <i>norme des accélérations</i> > 6 m/s² et <i>jerk</i> > 2 g/s • Si <i>vitesse</i> > 80 km/h et <i>norme des accélérations</i> > 5 m/s² et <i>jerk</i> > 2 g/s • Si <i>vitesse</i> > 100 km/h et <i>norme des accélérations</i> > 4 m/s² et <i>jerk</i> > 2 g/s
Hankey et al. (2016) Projet SHRP2 ² USA	<ul style="list-style-type: none"> • $acc_long \geq 0,5 \text{ g}$ • $acc_long \leq -0,65 \text{ g}$ • $acc_long \leq -0,3 \text{ g}$ et type de route = autoroute • $acc_lat \geq 0,75 \text{ g}$
Benmimoun et al. (2011) Projet euroFot Europe	<ul style="list-style-type: none"> • Si <i>vitesse</i> < 50 km/h et <i>acc_long</i> ≤ -6 m/s² • Si 50 km/h ≤ <i>vitesse</i> ≤ 150 km/h et <i>acc_long</i> (en m/s²) ≤ -6 + <i>vitesse</i>/50 • Si <i>vitesse</i> > 150 km/h et <i>acc_long</i> ≤ -4 m/s² • Si <i>vitesse</i> < 40 km/h et $acc_lat \geq 3 + vitesse/10$ • Si 40 km/h ≤ <i>vitesse</i> ≤ 50 km/h et $acc_lat \geq 7$ • Si 50 km/h < <i>vitesse</i> ≤ 100 km/h et $acc_lat \geq 7 - 3.vitesse/50$ • Si <i>vitesse</i> > 100 km/h et $acc_long \geq 4$

Seuils de détection d'incidents basés sur les accélérations tels que définis dans quelques références bibliographiques (*acc_long* = accélération longitudinale ; *acc_lat* = accélération latérale)

Observer des franchissements momentanés de seuils peut toutefois conduire à capturer de nombreux faux positifs, car les signaux cinématiques peuvent avoir des pics élevés au sein de leur intervalle de fonctionnement normal. Pour remédier à cela, certains états dynamiques ne sont associés à des incidents que si les seuils prédéfinis sont dépassés sur un laps de temps suffisant (Naude et al., 2019).

Au-delà des accélérations longitudinales et/ou transversales (et parfois de leurs dérivées), la vitesse de lacet (Benmimoun et al., 2011) et/ou sa dérivée sont également utilisées (Hankey et al., 2016). Les seuils de déclenchement associés sont souvent modulés en fonction d'autres critères et notamment la vitesse.

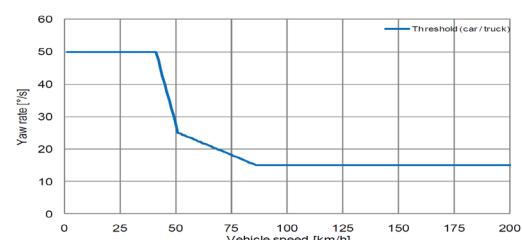


Figure n° 2 : Seuil de déclenchement sur la vitesse de lacet utilisé dans le projet euroFot (Benmimoun, 2011)

2.1.2 La détection d'incidents basée sur des marges de sécurité réduites

Cette approche repose sur la recherche de conflits de trafic (Zheng et al. 2021³) définis dans les années 1970 comme des « situations observables dans lesquelles deux usagers ou plus s'approchent l'un de l'autre dans le temps et l'espace à un tel point que la collision est imminente si leurs mouvements restent inchangés » (Admundsen et Hyden, 1977). Il s'agit d'un concept associant les conditions de circulation (proximité des usagers et différentiel de vitesse) et les actions d'évitement mises en œuvres par les usagers pour éviter l'accident. Ce concept a d'abord été utilisé dans le cadre d'observations bord de voie avant d'être repris et adapté pour les études s'appuyant des dispositifs embarqués dans les véhicules.

Les critères de détection combinent donc des indicateurs de proximité de temps ou de distance tels que le TTC (time-to-collision) ou le PET⁴ (post encroachment time) et des proxys des manœuvres d'évitement caractérisées généralement par des critères dynamiques tels que les décélérations et/ou la vitesse de lacet et/ou les actions du conducteur (appui sur le pédale de freins, coup de volant...).

À titre d'exemple, le 100-cars-study (étude de données naturelles de conduite au Etats Unis avec 241 conducteurs et 100 véhicules ayant collecté 2 millions de miles sur 43 000 heures de conduite) incluait des critères de déclenchement basés sur le risque de collision avant et arrière définis tels quels dans le tableau ci-après.

Tableau n° 2 : Critères de déclenchement relatifs au risque de collision

Trigger type	Description
Forward time-to-collision	<ul style="list-style-type: none"> Acceleration or deceleration equal to or greater than 0.5 g coupled with a forward TTC of 4 seconds or less. All longitudinal decelerations between 0.4 g and 0.5 g coupled with a forward TTC value of = 4 seconds and that the corresponding forward range value at the minimum TTC is not greater than 100 ft.
Rear time-to-collision	<ul style="list-style-type: none"> Any rear TTC trigger value of 2 seconds or less that also has a corresponding rear range distance of = 50 feet and any rear TTC trigger value in which the absolute acceleration of the following vehicle is greater than 0.3 g.

Seuils de détection utilisés dans le 100-cars-study : critères de déclenchement relatifs au risque de collision avant et arrière (Dingus et al., 2006).

2.1.3 Les incidents basés sur les aides à la conduite

Une approche assez naturelle consiste à utiliser les alertes des aides à la conduite qui sont de plus en plus nombreuses dans les véhicules : l'ABS (Anti-lock Braking System), l'ESP (Electronic Stability Program), le LDW (Lane Departure Warning)...

³ Cette section reprend de nombreux éléments de cette publication.

⁴ Différence de temps entre le moment où un véhicule quitte le point de collision potentiel et l'instant où l'autre véhicule arrive à ce point.

On notera que l'activation de ces systèmes d'aide est très dépendante de la marque et du modèle de véhicule (équipementier fournissant le dispositif). Les signaux récupérés de ces systèmes sont souvent binaires (non-activé / activé). Ce type d'indicateur est utilisé dans des projets tels que SHRP2 (Hankley, 2019) et euroFot (Benmimoun, 2011).

2.1.4 Les incidents basés sur le comportement des conducteurs

Au-delà des fortes sollicitations dynamiques des véhicules, la détection d'incidents peut également reposer sur l'observation de certains comportements du conducteur jugés dangereux : dépassement de la vitesse maximale autorisée (Levick et al., 2005 ; Farmer et al. , 2010 par exemple) , somnolence (Kuo et al.,2019), inattention (Young et al.,2019)...

Toutefois, ces éléments sont généralement plutôt détectés pour mieux comprendre et quantifier le potentiel sur-risque d'accidents que ces comportements peuvent engendrer. Dans certains, cas ils sont également utilisés pour établir des indicateurs de risque propres à un conducteur ou pour étudier son comportement. Ainsi Toledo et al. (2008) s'appuient sur les données brutes recueillies par les boîtiers (accélération, vitesse, GPS,...) pour reconnaître 20 types de manœuvres (changement de voies, freinage brutal, excès de vitesse,...) classifiées selon trois degrés de sévérité. Ces manœuvres sont ensuite utilisées pour calculer des indices de risques (spécifiques à un conducteur, à un véhicule,) selon

$$\text{l'équation suivante : } R_{it} = \frac{\sum_j \sum_s \beta_{js} N_{ijst}}{DT_{it}} \quad (\text{eq .1})$$

- R_{it} est le risque pour l'individu i pendant la période t
- DT_{it} est le temps total de conduite pendant la période t
- N_{ijst} est le nombre de manœuvre de type j et de sévérité s que le conducteur i a réalisé
- β_{js} sont des poids affectés aux différentes manœuvres

2.1.5 Incidents déclarés par le conducteur

Dans certaines expérimentations, le recueil peut également mettre à contribution le conducteur en lui permettant de signaler par lui-même une situation qu'il juge critique et éventuellement de la commenter.

Ainsi, dans certains projets les conducteurs disposaient d'un bouton qu'ils pouvaient presser pour signaler un potentiel événement d'intérêt et en commenter la nature, en direct à l'aide d'un enregistrement audio (Hawley et al. 2016), ou en différé en remplissant des fiches (Palat et al., 2019).

2.1.6 Incidents identifiés par la visualisation de vidéos

Enfin, dans certains cas, l'identification des situations critiques est opérée par le visionnage des vidéos des scènes de conduite par des analystes. Cette détection a parfois lieu lors du visionnage des séquences vidéo à d'autres fins que la recherche d'incidents (Hawley et al.,2016).

2.2 Les dispositifs de recueil

2.2.1 Les systèmes embarqués

Il s'agit de dispositifs capables de mesurer, en continu, un ensemble de paramètres de conduite (dynamique du véhicule, comportement du conducteur, contexte de conduite...). Ces mesures sont analysées pour déterminer si la situation de conduite correspond à une situation incidentogène. Cette analyse est réalisée, soit en temps réel par le dispositif de recueil lui-même, soit en différé par des post-traitements. Dans les deux cas, les événements ainsi détectés ne prennent généralement le statut définitif d'incidents qu'après avoir été analysés et validés par un opérateur humain⁵.

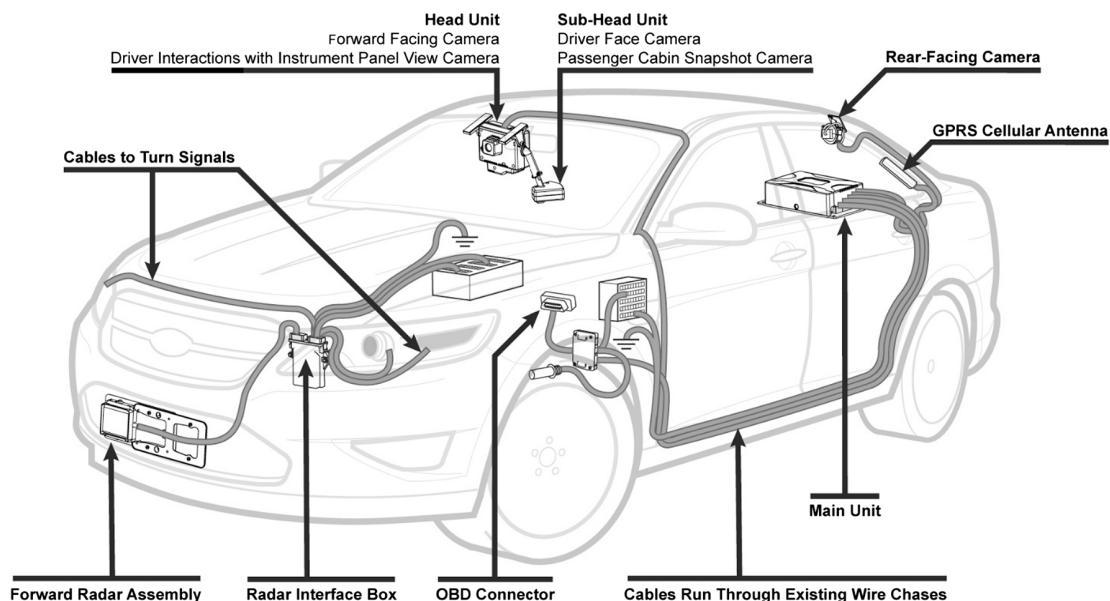


Figure n° 3 : Schéma d'un système d'acquisition de données (Antin et al., 2019)

z

Le recueil embarqué des incidents peut, selon les cas, s'appuyer sur :

- une instrumentation relativement légère qu'il s'agisse d'un boîtier spécifique ou d'un smartphone comportant typiquement au moins des accéléromètres et un récepteur GPS. Elle est interfacée ou non avec le bus CAN du véhicule et éventuellement couplée à une caméra permettant de contextualiser la situation de conduite au moment de la survenue de l'incident.

Les données conservées se limitent généralement à des fenêtres temporelles de quelques dizaines de secondes autour du moment de l'incident. Elles sont parfois accompagnées du recueil de quelques données d'expositions comme les traces GPS de l'ensemble des parcours par exemple.

⁵ Le processus de validation est fortement dépendant des données disponibles (présence ou non de vidéo par exemple).

- une instrumentation largement plus sophistiquée intégrant un nombre plus important de capteurs : lidar, radar, caméras filmant le conducteur, eye tracker... L'ensemble des données recueillies est conservé, conduisant à un stockage de données très volumineux. Ce type d'expérimentation est en général utilisé pour des travaux plus larges que la seule étude des incidents. Il s'agit typiquement des instrumentations mises en œuvres pour les études en situation de conduite naturelle (naturalistic driving studies ou NDS en anglais).

Grimberg et al. (2019) dressent un panorama assez complet des différentes solutions d'acquisition mises en œuvre dans diverses études et recherches.

2.2.2 Les systèmes bord de voie⁶

L'observation d'incidents de conduite repose généralement sur des enregistrements vidéo issus de caméras filmant une zone spécifique de l'espace routier (intersection, section courante). Ces enregistrements peuvent être éventuellement couplés à d'autres systèmes de mesure tels que des cinémomètres, des lidars... (Arun et al., 2021). Les données recueillies font ensuite l'objet de traitements permettant de calculer les indicateurs recherchés (cf. 2.1.2).

⁶ *NOTE : Les systèmes de détection automatique d'incidents (DAI) sont également des systèmes permettant de détecter des incidents. Leur portée se limite toutefois à l'identification de situations conflictuelles pouvant perturber l'écoulement du trafic. Ils ne sont donc pas traités ici.*

2.3 Lien entre incidents et accidents

De nombreuses recherches étudient le lien entre incidents (selon les critères de déclenchement prédéfinis) et accidents. Certaines ont montré d'une part qu'un tel lien pouvait exister et, d'autre part que l'incidentologie pouvait se révéler un outil intéressant pour mieux appréhender le risque routier et proposer des mesures préventives.

Par exemple, une exploitation des données du 100-cars study (Dingus et al., 2006), a montré qu'il existe des liens entre les presqu'accidents (incidents issus d'un déclenchement associant la détection d'un franchissement d'un paramètre dynamique et la réalisation d'une manœuvre d'évitement de la part du conducteur). Par contre, le lien entre accidents et incidents détectés uniquement sur des critères dynamiques semble moins évident. De plus, l'étude montre que la force des liens est fragile et dépend fortement du type d'accident.

Une autre recherche (Guo et al., 2010), sur ces mêmes données, établit que même s'il existe une différence statistique concernant les manœuvres d'évitements (plus représentées pour les presque-accidents par rapport aux accidents), il n'existe aucune différence statistique concernant le nombre et la nature des facteurs contributifs (causalité) entre accidents et presque-accidents (hormis pour les évènements de type choc arrière avec le véhicule instrumenté circulant derrière l'autre véhicule). Ce constat suggère qu'il n'y pas de différence concernant les mécanismes de survenue des presque-accidents et des accidents. Cette étude a également établi :

- qu'il existe une relation positive entre la fréquence des accidents et des incidents et ce même sous l'effet de certaines variables comme l'âge, le genre, les conditions de luminosité, les conditions climatiques ;
- que l'appréhension du risque d'accident est améliorée lorsque l'on utilise à la fois les accidents et les presque-accidents plutôt que les accidents seuls.

Par ailleurs, des investigations menées sur les données de SHRP2 et du CNDS (Canada Naturalistic Driving Study) indiquent que dans près de 70% des accidents au moins l'un des triggers dynamiques liés aux accélérations longitudinales ou à l'ABS ou au jerk latéral a été déclenché. L'étude insiste toutefois sur la très (trop) forte proportion de faux négatifs générés. Elle conclue néanmoins sur la possibilité d'utiliser différentes techniques (filtrage, techniques statistique avancées, intelligence artificielle...) permettant d'améliorer ces résultats.

La question de la relation entre incidents et accidents a également été abordée en analysant le lien entre les antécédents accidentologiques des conducteurs et des indicateurs calculés à partir des données recueillies en condition de conduite naturelle. Ainsi plusieurs expérimentations menées en Israël (Toledo & Lotan, 2006 ; Musicant et al., 2007 ; Toledo et al. , 2008) ont démontré qu'il existait une corrélation positive entre un indicateur de risque individuel (voir équation au 2.1.4) et les antécédents accidentologiques des conducteurs (sur trois ou cinq ans).

D'autres études (Bagdadi, 2011 ; Bagdadi, 2013) ont montré que l'accroissement du risque qu'un conducteur soit impliqué dans un accident augmente avec sa propension à générer des jerks critiques.

Enfin, certaines expérimentations ont conclu à l'intérêt opérationnel de la détection des incidents pour identifier des zones à risques et/ou de vigilance pour les gestionnaires routiers (par exemple dans le projet SVRAI Ledoux et al., 2014 ; ainsi que dans Aichinger et al. 2016).

3 SCENARIOS CRITIQUES

L'approche consiste, pour un macro cas d'usage du véhicule autonome particulier, à

- confronter une liste d'événements identifiés à des situations de conduite,
- évaluer, pour chacun de ces croisements, la criticité en fonction du niveau de trafic. La criticité est fonction des trois paramètres suivants : (1) la sévérité qui se base sur le nombre de blessés ou de tués dans le cas où un accident se produirait, (2) la fréquence d'occurrence et (3) la contrôlabilité.

Dans ce livrable, nous déployerons cette approche sur un cas d'usage de véhicule automatisé niveau 3 sur autoroute.

3.1 Méthodologie pour identifier les scénarios les plus critiques pour les véhicules autonomes

Cette méthodologie (Tattegrain, Hedli et Aniss 2018) s'appuie sur les connaissances de l'Université Gustave Eiffel sur la conduite et s'inspire de l'approche ISO 26262 pour son déroulement. Il faut bien noter que, proches de la norme ISO 26262 d'un point de vue organisationnel, les objectifs de notre méthode sont très différents. L'ISO 26262 est une norme **pour les systèmes de sécurité dans le secteur automobile**. Cette norme a pour objectif de permettre au constructeur de garantir la sécurité fonctionnelle d'un système électrique/électronique dans le véhicule. En 2010, Schlummer et al. (2010) montrent la pertinence et l'importance d'une des tâches majeures de l'ISO 26262. Une approche technique basée sur des fonctionnalités du système comme celle de Nowakowski et al. (2016) peut fournir un point de départ pour spécifier les exigences minimales de performance des systèmes de conduite automatique (ADS) et les procédures d'essai nécessaires pour vérifier que ces exigences ont été respectées. Un autre type d'approche est axé sur l'analyse des événements critiques dans la base de données d'essais opérationnels sur le terrain et la base de données d'accidents pour identifier les scénarios pertinents (Zlocki et al., 2015). Ce type d'approches est basé sur les connaissances des experts sur les risques en sécurité routière. Notre méthode s'inspire de ces deux approches en utilisant les matrices de criticité de la première et les analyses terrain de la deuxième.

La méthode proposée offre une vision plus systémique que la deuxième approche avec l'objectif **d'identifier les scénarios critiques à partir de l'ensemble des situations de conduite** pouvant être rencontrées par le véhicule autonome **et non des situations d'accident**. Contrairement à la plupart des projets sur le véhicule automatisé qui se basent souvent sur la définition de cas d'usage à partir du fonctionnement technologique attendu du véhicule et/ou de situations critiques à résoudre, la méthode a une vision plus systémique du triptyque Infrastructure /Conducteur /Véhicule pour identifier les scénarios critiques.

Un scénario est défini comme « **la survenue d'un événement dans un contexte routier particulier défini par une action de conduite sur une infrastructure avec un niveau de trafic donné** ».

Cette vision a l'avantage de prendre en compte un ensemble de situations plus importantes et de déterminer leur criticité en fonction de leur impact potentiel en termes de sécurité.

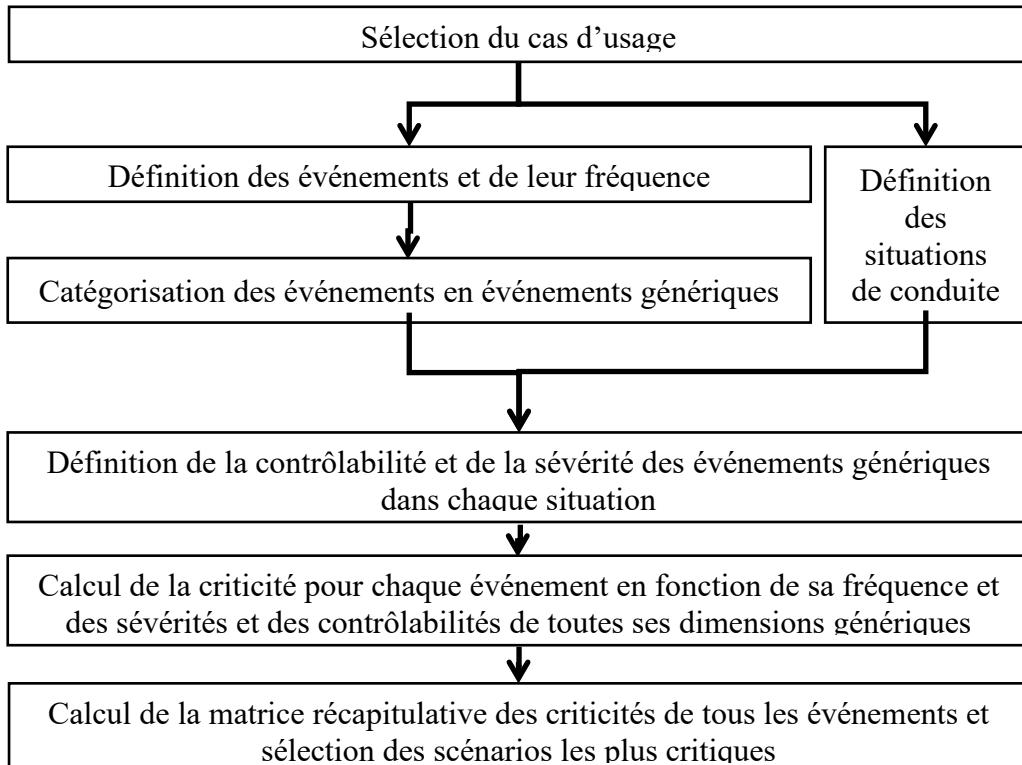


Figure n° 4 : Synoptique de la méthodologie

La méthode développée se déroule en plusieurs étapes :

- La sélection du cas d'usage permet de définir le niveau d'automatisation envisagé et la fonction principale à tester dans son domaine de fonctionnement.
- La liste des actions de conduite sur des infrastructures a été définie par les experts de l'Université Gustave Eiffel en fonction de notre connaissance des facteurs impactant l'activité de conduite.
- La liste des événements a été définie par des experts des différents services ministériels en charge de l'exploitation des réseaux routiers et de la sécurité routière en France. Ils ont ainsi recensé le plus grand nombre possible d'événements qu'ils ont l'habitude de rencontrer sur l'infrastructure ciblée dans le cas d'usage qui sera l'autoroute dans ce livrable. Ces événements ne sont pas des dysfonctionnements du réseau routier mais des incidents se produisant plus ou moins fréquemment et qui sont plus ou moins bien pris en compte dans les scénarios d'usage définis dans les différents projets de développement des véhicules autonomes.
- Le nombre de ces événements étant très nombreux, ils ont été caractérisés par le type de fonctions de conduite qu'ils pouvaient impacter. Ceci a permis d'identifier un certain nombre d'événements génériques décrivant l'impact que les événements initiaux pouvaient avoir sur les contrôles longitudinal et latéral, sur la perception d'information...
- Puis, chacun des événements génériques a été coté en termes de sévérité et de contrôlabilité pour chacune des situations de conduite.
- Pour définir la criticité de chaque événement, la criticité de chacune de ses dimensions génériques a été calculée en utilisant la matrice de criticité de l'ISO 26262 et la criticité de l'événement a été définie par la valeur maximale de celles des dimensions.
- L'ensemble de ces calculs est récapitulé dans une matrice générale.

3.2 Mise en œuvre de la méthodologie

3.2.1 Sélection du cas d'usage

Le cas d'usage choisi dans le rapport a été le véhicule particulier de niveau d'automatisation 3 (niveau SAE de 2019) sur autoroute. Vu les évolutions constantes des définitions de ces niveaux, les hypothèses suivantes ont été définies sur ce cas d'usage :

- L'infrastructure est une autoroute à chaussées séparées soit par des glissières soit par des plots. Il y a un accès contrôlé à cette infrastructure : les entrées/sorties se font soit par un péage soit par un échangeur, soit par des voies d'accélération ou de décélération.
- La manœuvre qui est prévue si le conducteur ne répond pas aux sollicitations du véhicule pour reprendre la main est une mise à l'arrêt progressive dans la voie de circulation et non une mise en sécurité sur la voie d'arrêt d'urgence de l'autoroute ou sur une aire de repos. Bien que cette manœuvre ne soit pas obligatoire dans la norme SAE J3016 (SAE 2016), cette hypothèse fait partie des discussions du groupe ITS/AD-AH (TIS AD 2017) (« 3. System automatically deactivated only after requesting the driver to take-over with a sufficient lead time; may – under certain, limited circumstances – transition (at least initiate) to minimal risk condition if the human driver does not take over.”. Ce groupe de travail relève du Forum mondial des Nations Unies pour l'harmonisation des Règlements concernant les véhicules (WP.29), qui permet aux autorités gouvernementales du monde entier de coopérer à l'établissement des prescriptions de performance des véhicules.
- La conduite autonome est activée uniquement si le véhicule est déjà sur autoroute. Il n'y a donc pas de scénarios d'insertion autonome sur autoroute. Si un véhicule autonome prévoit de faire ces manœuvres, il faudrait rajouter ces situations de conduite.

3.2.2 Définition des situations de conduite

La liste des actions de conduite sur des infrastructures a été définie par les experts. Travaillant depuis de nombreuses années sur l'activité de conduite et sur la modélisation du conducteur (Tattegrain et al., 1996), ils ont une connaissance des différents comportements de conduite.

Tableau n° 3 : Combinaison des situations sélectionnées dans le rapport

Infrastructure	Manœuvre	
	Circulation sur la même voie	Changer de voie
Ligne droite	x	x
Courbe	x	x
Ligne droite dans tunnel	x	x
Arrivée sur péage		x
Fin de voie réservée ou auxiliaire		x
Début de voie réservée ou auxiliaire		x
Échangeur autoroutier	x	
Sortie d'un tunnel	x	
Entrée dans un tunnel	x	

Dans un premier temps, la méthodologie demande de recenser les différentes configurations d'infrastructures rencontrées dans le cas d'usage, puis d'identifier les différentes manœuvres que le cas d'usage permettait. En utilisant ce cas d'usage, nous avons identifié qu'il y avait peu de manœuvres sur l'autoroute à part la circulation sur la même voie ou le changement de voie. Par contre, le type d'infrastructure est beaucoup plus varié. En se basant sur le modèle de Rassmussen

et al. (1983), il est important de différencier les lignes droites des courbes. En effet, la reprise en main n'est pas difficile si le volant du véhicule est droit. Mais si le volant n'est pas droit, le contrôle est plus difficile. En effet, la gestion des mouvements latéraux est très souvent complètement réalisée de manière automatique par le conducteur. Il faut donc que les courbes soient traitées différemment car il est difficile de reprendre le contrôle d'un véhicule au milieu d'une courbe si la manœuvre est déjà démarrée. Ce problème est le même lors des changements de voie.

Dans le cadre de cette étude, quatre niveaux de trafic ont été définis correspondant aux critères suivants :

Tableau n° 4 : Définition du trafic

Niveau	Définition	Si Vmax=110 km/h
Fluide	Vitesse max > Vitesse > 75% Vitesse max	110 km/h > V > 80 km/h
Dense	75% Vitesse max > Vitesse > 50% Vitesse max	80 km/h > V > 65 km/h
Saturé	50% Vitesse max > Vitesse > 25% Vitesse max	65 km/h > V > 30 km/h
Bloqué	Vitesse < 25% Vitesse Max	V < 30 km/h

3.2.3 Définition des événements

Les événements ont été classifiés en plusieurs catégories :

Événements liés à l'état de la signalisation comme par exemple :

- Signalisation horizontale – marquage longitudinal partiellement effacé ou peu visible sur plusieurs dizaines de mètres (ou masquage par objet sur chaussée)
- Signalisation horizontale – marquage longitudinal totalement effacé (réfection de voie)
- Signalisation verticale – feux d'affectation de voie en panne

Événements météo inopinés et dangereux, comme par exemple :

- Circuler en présence de plaques de brouillard denses
- Problème d'adhérence localisé (plaques de verglas localisées, ou flaque d'huile par analogie)
- Zones de chaussées inondées avec risque d'aquaplaning,
- Neige

Événements liés à l'état de l'infrastructure :

- Dégradations ponctuelles de la chaussée ("nid de poules")
- Glissières de sécurité déformées

Événements liés à l'usage de l'infrastructure comme par exemple :

- Piétons sur les voies
- Obstacle sur la voie (objets sur les voies ou perte de chargement du véhicule précédent)
- Circulation d'un engin de service hivernal (dépassement interdit)

Événements liés aux interactions avec d'autres usagers roulants comme par exemple :

- Véhicules prioritaires
- Injonctions de forces de l'ordre
- Arrivée sur queue de bouchon
- Freinage d'urgence du véhicule précédent
- Dépassement par la droite
- Remontée de file de 2RM

3.2.3.1 Décomposition des évènements en évènements génériques

Chaque événement a été caractérisé par un ensemble d'évènements génériques pouvant impacter la conduite. Les évènements génériques permettent de caractériser les différentes dimensions des événements initiaux. Ils décrivent l'impact que les événements initiaux pouvaient avoir sur les contrôles ou les consignes longitudinaux et latéraux. Pour certains événements, il était important de caractériser la durée du phénomène ce qui nous a conduit à définir certaines dimensions comme « ponctuelles ou étendues ».

Problèmes pour assurer le contrôle latéral du véhicule :

- Absence de repère horizontal ponctuel pour guidage latéral dans la voie (ex marquage)
- Absence de repère horizontal étendu pour guidage latéral dans la voie (ex marquage)
- Absence de repère vertical pour guidage latéral dans la voie ponctuel (ex balise)
- Absence de repère vertical pour guidage latéral dans la voie étendu (ex glissière)
- Déviation latérale due à un phénomène extérieur

Problèmes pour définir la consigne latérale du véhicule :

- Problème d'accès aux instructions pour le déplacement latéral (usage et affectation des voies)
- Modifications des instructions pour le déplacement latéral
- Problème d'accès aux instructions de direction
- Problème possible d'interprétation des instructions pour le déplacement latéral
- Problème probable d'interprétation des instructions pour le déplacement latéral

Problèmes pour définir la consigne longitudinale du véhicule :

- Modification possible de repère pour consigne longitudinale
- Problème d'accès aux instructions pour le déplacement longitudinal (ex consigne de vitesse ponctuelle)
- Absence de consigne de vitesse générale

Problèmes d'adhérence pour le contrôle du véhicule :

- Problème d'adhérence ponctuel
- Problème d'adhérence étendu

Présence et position des autres impliqués :

- Obstacles fixes sur la chaussée
- Obstacles mobiles sur la chaussée (hors usagers vulnérables)
- Obstacles mobiles sur une voie adjacente (hors UV)
- Obstacles mobiles empiétant sur la voie
- Usagers vulnérables sur des voies
- Usagers vulnérables près des voies

Par exemple, l'événement : « Agents d'entretien (intervention en urgence) » a les dimensions suivantes :

- Modification des instructions pour le déplacement latéral car une zone de protection des agents est mise en place et les véhicules doivent s'écartez de cette zone
- Absence de zone de mise sécurité durable (absence ou réduction de la bande d'arrêt d'urgence) car la bande d'arrêt d'urgence est souvent utilisée pour mettre les véhicules impliqués en sécurité
- Usagers vulnérables près des voies car les agents sont souvent sortis de leur véhicule de patrouille
- Obstacles fixes sur la chaussée car il y a souvent des véhicules impliqués

- Problème probable de décision ou d'interprétation des instructions pour le déplacement latéral car les instructions des agents dépendent de la configuration de l'accident ce qui demande au conducteur de bien interpréter leurs gestes.

3.2.3.2 Définition de la fréquence d'occurrence des événements

Le terme de fréquence peut décrire deux idées, soit le nombre de fois où une action, un phénomène ou un fait se produit dans un temps donné, soit la durée d'exposition au risque. Dans l'exemple d'une défaillance de la colonne de direction, la fréquence est infime, par contre, l'exposition est quasi permanente dès que la voiture roule. Dans la méthode, le premier concept a été utilisé avec la définition de l'ISO.

Tableau n° 5 : Définition de l'ISO pour la fréquence

Class	Description	Definition of frequency
E0	Incredible	-
E1	Very low probability	Situations that occur less often than once a year for the great majority of drivers
E2	Low probability	Situations that occur less often than a few times a year for the great majority of drivers
E3	Medium probability	Situations that occur once a month or more often for an average driver
E4	High probability	Situations that occur almost every drive on average

La définition de la fréquence de l'ISO a été utilisée la plupart du temps pour définir la fréquence. Par contre, pour des événements qui doivent absolument être gérés par le véhicule en toute sécurité comme le masquage d'un marquage sur la route, le niveau E4 sera souvent choisi. Enfin, il faut noter que ce paramètre est difficile à évaluer en général car il dépend de la localisation géographique des conducteurs (pays, région), de la taille de leur ville mais aussi de leurs habitudes de déplacements. Dans ce rapport, l'hypothèse prise a été que la population cible est la population française et donc que la fréquence des événements sera une estimation de leur occurrence en France.

3.2.4 Définition de la contrôlabilité des événements génériques dans chaque situation

Un autre concept issu de la norme ISO est celui de contrôlabilité. Ce concept doit être précisé pour son application au cas du véhicule autonome. En effet, dans la norme ISO, l'hypothèse est que le conducteur est toujours en mode de conduite et a une conscience de la situation routière adéquate alors que dans la conduite autonome, le conducteur peut faire autre chose pendant un certain temps. Il est donc important de raisonner sur la capacité du conducteur à gérer l'événement si le véhicule lui demande de reprendre la main. L'hypothèse de base pour estimer la contrôlabilité est que le conducteur avait un délai de plusieurs secondes pour reprendre la main. Les taux de réussite présentés dans le tableau suivant sont indicatifs. Il n'est pas possible de faire toutes les expérimentations pour vérifier que ces taux sont atteints et même si ces expérimentations étaient possibles, les biais de sélection des panels de participants seront toujours présents. La contrôlabilité est donc une estimation par des experts et doit être discutée en groupe pour faire une cotation réaliste.

Tableau n° 6 : Définition de l'ISO pour la contrôlabilité

Class	Description	Définition
C0	Controllable	
C1	Simply controllable	99% or more of all drivers or other traffic participants are usually able to avoid a specific harm
C2	Normally controllable	90% or more of all drivers or other traffic participants are usually able to avoid a specific harm
C3	Difficult to control or uncontrollable	Less than 90% of all drivers or other traffic participants are usually able to avoid a specific harm

Ce travail de cotation de la contrôlabilité pour les événements génériques a été fait pour tous les événements génériques identifiés dans notre cas d'usage. Il est assez long mais ne doit être fait que pour les nouveaux événements génériques.

Tableau n° 7 : Cotation de la contrôlabilité

		Contrôlabilité							
		Circulation sur la même voie en ligne droite				Circulation sur la même voie en courbe			
		Fluide	Dense	Saturé	Bloqué	Fluide	Dense	Saturé	Bloqué
Situations de conduite									
Trafic =>		Fluide	Dense	Saturé	Bloqué	Fluide	Dense	Saturé	Bloqué
Événement génériques									
Modification des instructions pour le déplacement latéral		1	1	1	1	2	2	1	1
Obstacles fixes sur la chaussée		2	3	2	1	3	3	2	1
Problèmes probables de décision ou d'interprétation des instructions pour le déplacement latéral		1	3	2	1	1	3	3	1
Usagers vulnérables près des voies		1	1	1	1	2	3	3	1

En termes de contrôlabilité, les paramètres à considérer sont (a) la manœuvre en cours et (b) les événements génériques impactés par l'événement. Par exemple, lorsque la manœuvre consiste à aller tout droit et que l'événement générique n'est pas sur sa trajectoire (un usager vulnérable près des voies et non sur la voie), la situation est contrôlable.

En revanche, en cas d'obstacle sur la voie, la situation devient

- Très difficilement contrôlable avec un trafic dense
- Moyennement contrôlable en trafic fluide à cause de la vitesse
- Moyennement contrôlable en trafic saturé car présence de nombreux autres usagers
- Facilement contrôlable à faible vitesse

En revanche, pour les événements génériques ayant un impact sur les déplacements latéraux, la fonction simple de “modifications des instructions pour les déplacements latéraux” est plus facilement contrôlable que celle de “Problèmes probables d’interprétation des instructions pour le déplacement latéral”. En outre, la contrôlabilité est plus difficile en cas de manœuvre de changement de voie qu’en ligne droite. Par exemple, dans la situation “Rouler dans la même voie en trafic saturé en ligne droite”, la contrôlabilité de “modifications des instructions pour les déplacements latéraux” prend la valeur 1 alors que celle de “Problème probables d’interprétation des instructions pour le déplacement latéral” est à 2 et cette dernière passe à 3 dans une courbe.

3.2.5 Définition de la sévérité des événements génériques dans chaque situation

Le dernier concept utilisé issu de la norme est le concept de sévérité. Il prend en compte la probabilité qu'il y ait des blessés dans le cas où un accident surviendrait. Cette sévérité dépend donc essentiellement de la vitesse du véhicule liée au trafic et du type de personnes pouvant être impliquées dans l'accident. Un accident en trafic fluide sur autoroute aura une sévérité importante car le véhicule devrait rouler à une vitesse de 130km/h tandis qu'en trafic bloqué, elle ne devrait pas dépasser 30km/h et en trafic saturé, elle devrait se situer entre 30 et 70 km/h. Par contre, si des usagers vulnérables sont impliqués, même en trafic saturé la sévérité sera importante.

Tableau n° 8 : Définition de l'ISO pour la sévérité

Class	Description
S0	No injuries
S1	Light and moderate injuries
S2	Severe and life-threatening injuries (survival probable)
S3	Life-threatening injuries (survival uncertain), fatal injuries

Tableau n° 9 : Cotation de la sévérité

	Sévérité							
	Circulation sur la même voie en ligne droite		Circulation sur la même voie en courbe		Fluide	Dense	Saturé	Bloqué
	Fluide	Dense	Saturé	Bloqué				
Situations de conduite								
Trafic =>								
Évènements génériques								
Modification des instructions pour le déplacement latéral	3	3	1	0	3	3	2	0
Obstacles fixes sur la chaussée	3	3	1	0	3	3	2	0
Problèmes probables de décision ou d’interprétation des instructions pour le déplacement latéral	3	3	1	0	3	3	2	0
Usagers vulnérables près des voies	3	3	3	1	3	3	3	1

Cette sévérité dépend de la vitesse du véhicule qui est liée au trafic : si le trafic est fluide ou dense la vitesse est importante et la sévérité forte et a contrario si le trafic est bloqué la vitesse est très faible et la sévérité aussi sauf s'il y a des usagers vulnérables en cause donc la sévérité dépend aussi du type de personnes pouvant être impliquées dans l'accident.

3.2.6 Calcul de la criticité pour chaque événement en fonction de sa fréquence et des sévérités et des contrôlabilités de toutes ses dimensions génériques

Pour chaque dimension générique de l'événement, la criticité est calculée à partir de la matrice de criticité avec :

- Fréquence = fréquence de l'événement initial
- Sévérité = sévérité de l'événement générique
- La contrôlabilité est celle de l'événement générique si elle est supérieure à celle de l'événement initial, sinon c'est la contrôlabilité de l'événement initial qui est utilisée pour déterminer la criticité

Tableau n° 10 : Matrice ISO 26262 de calcul de criticité en fonction de la Fréquence, contrôlabilité et sévérité

Severity	Frequency	Controlability		
		C1	C2	C3
S0	E1	0	0	0
	E2	0	0	0
	E3	0	0	0
	E4	0	0	0
S1	E1	1	1	1
	E2	1	1	1
	E3	1	1	2
	E4	1	2	3
S2	E1	1	1	1
	E2	1	1	2
	E3	1	2	3
	E4	2	3	4
S3	E1	1	1	2
	E2	1	2	3
	E3	2	3	4
	E4	3	4	5

Dans le cas de l'événement initial « Agents d'entretien (intervention en urgence) ».

Celui-ci a une fréquence de 4.

Pour la situation de conduite « rouler sur la même voie en courbe en trafic dense », sa dimension générique « usager vulnérable près des voies », la sévérité est de 3 car si le choc a lieu l'usager vulnérable risque d'être gravement blessé ou tué et la contrôlabilité est de 3 car le conducteur devra gérer en même temps sa trajectoire dans une courbe et la présence de piéton près des voies. Cette contrôlabilité étant plus importante que celle de l'événement initial, c'est cette valeur qui sera conservée.

Il suffit de rechercher dans la matrice de criticité de l'ISO 26262, la valeur de ce triplet [E3, S3, C3] qui correspond dans notre exemple à une criticité de 5.

Tableau n° 11 : Cotation de la criticité

		Criticité							
		Circulation sur la même voie en ligne droite				Circulation sur la même voie en courbe			
		Fluide	Dense	Saturé	Bloqué	Fluide	Dense	Saturé	Bloqué
Situations de conduite									
Trafic =>		4	5	3	1	5	5	5	1
Criticité événement		3	3	1	0	4	2	0	3
Modification des instructions pour le déplacement latéral		4	5	2	0	5	5	3	0
Obstacles fixes sur la chaussée		3	5	2	0	3	5	4	0
Problèmes probables de décision ou d'interprétation des instructions pour le déplacement latéral		3	3	3	1	4	5	5	1
Usagers vulnérables près des voies		3	3	3	1	4	5	5	1

Lorsque toutes les criticités des événements génériques sont calculées, la criticité de chaque situation de conduite de l'événement initial est déduite en prenant la criticité maximale parmi celles des événements génériques sur chaque situation de conduite.

3.2.7 Calcul de la matrice récapitulative des criticités de tous les événements et sélection des scénarios les plus critiques

Tableau n° 12 : Extrait d'une matrice pour le cas d'usage « véhicule particulier sur autoroute »

Criticité des événements suivant les manœuvres en cours du VA et le trafic sur le macro cas d'usage : véhicule particulier sur autoroute (niveau 3)																					
Criticité evenements																					
Situation de conduite pour le véhicule automatisé=>	Fréq.	Circulation sur même voie en ligne droite				Circulation sur même voie en courbe				Changement de voie en ligne droite				Circulation voie insertion : passage d'une autoroute à une autre				Péage sur l'autoroute			
État du trafic =>		F	D	S	B	F	D	S	B	F	D	S	B	F	D	S	B	F	D	S	B
Signalisation horizontale – marquage longitudinal partiellement effacé ou peu visible sur plusieurs dizaines de mètres (ou masquage par objet sur chaussée)	4	3	3	1	0	4	4	2	0	4	4	2	0	4	4	2	0	4	4	1	0
Signalisation horizontale – marquage longitudinal totalement effacé (réfection de voie)	3	3	3	1	0	3	4	2	0	3	4	2	0	4	4	2	0	4	4	1	0
Cohabitation signalisation horizontale temporaire et permanente (exemple : lignes jaunes + blanches non effacées, ou lignes jaunes + blanches effacées mais marques toujours visibles)	3	3	3	1	0	3	4	2	0	3	4	2	0	4	4	2	0	4	4	1	0
Signalisation verticale temporaire implantée différemment de la signalisation permanente (dont intervention urgente et véhicule en panne)	2	2	2	1	0	2	2	1	0	2	2	1	0	2	2	1	0	2	2	1	0
Signalisation verticale – feux d'affectation de voie en panne	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
Signalisation horizontale – marquage transversal effacé (affectation des voies, péage)	3	3	3	1	0	3	4	2	0	3	4	2	0	4	4	2	0	4	4	1	0
Signalisation verticale – feux d'affectation de voie en panne	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
Entrée dans plaques de brouillard denses	3	4	4	2	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	2	0
Circuler Plaques de brouillard denses	3	4	4	2	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	2	0
Problème d'adhérence localisé (Plaques de verglas localisées, flaque d'huile)	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1
Zones de chaussées inondées avec risque d'aquaplaning	3	4	4	3	2	4	4	3	2	4	4	3	2	4	4	3	2	4	4	3	2
Zones de chaussées avec enneigement	3	4	4	3	1	4	4	3	1	4	4	3	1	4	4	3	1	4	4	3	1
Coups de vents violents	2	2	2	1	0	2	2	1	0	2	2	1	0	2	2	1	0	2	2	1	0
Éblouissement (sortie tunnel, forte)	3	4	4	2	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	2	0

luminosité dont soleil rasant)																			
Éblouissement (entrée nappe de brouillard, neige très dense)	3	4	4	2	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4
Pluies fortes, neige, grêle, givre	3	4	4	3	2	4	4	3	2	4	4	3	2	4	4	3	2	4	4
Nuit	3	4	4	2	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4
Piétons sur les voies	3	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4
Piétons sur BAU	3	2	2	2	1	3	4	4	1	3	4	4	1	3	4	4	1	3	4
Animaux errants	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2
Agents d'entretien (intervention en urgences)	4	4	5	3	1	5	5	5	1	4	5	5	1	5	5	5	1	4	5
Forces de l'ordre ou de secours ou d'entretien sur accident	4	5	5	5	3	5	5	5	3	5	5	5	3	5	5	5	3	5	5
Ouverture/fermeture de la voie (travaux fixe ou mobile, intervention accident...)	4	5	5	3	1	5	5	5	1	5	5	5	1	5	5	5	1	5	5
Rabattement d'un autre usager devant et proche du VA	4	4	4	2	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	5	3	0	4	5
Véhicules prioritaires	3	3	3	1	0	3	3	2	0	3	3	2	0	3	3	2	0	3	3
Injonctions de forces de l'ordre	2	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3
Arrivée sur queue de bouchon	4	4	5	2	0	5	5	3	0	4	5	3	0	5	5	3	0	4	4
Freinage urgence du véhicule précédent	1	1	2	1	0	2	2	1	0	1	2	1	0	2	2	1	0	1	2
Dépassement par la droite	3	4	4	2	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4
Dépassement par 2 RM ou Remontée de file de 2RM	4	5	5	3	1	5	5	5	1	5	5	5	1	5	5	5	1	5	5
Comportement imprévisible d'un autre usager (chaotique)	1	2	2	1	0	2	2	1	0	2	2	1	0	2	2	1	0	2	2
Changement de file du véhicule de devant (sans clignotant)	4	4	4	2	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4
Activation des feux de détresse du véhicule de devant	3	3	3	1	0	3	3	2	0	3	3	2	0	3	4	2	0	3	4
Véhicule en insertion forçant le passage	3	4	4	2	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4	3	0	4	4
Véhicule à contresens	2	3	3	1	0	3	3	2	0	3	3	2	0	3	3	2	0	3	3
Signalisation verticale – fermeture instantanée d'axe en un point spécifique par signalisation dynamique (feux d'arrêt R24 avec ou sans barrières)	3	3	4	1	0	4	4	2	0	3	4	2	0	4	4	2	0	3	3

3.3 Analyse de la mise en œuvre de la méthode

Les niveaux de criticité 4 et 5

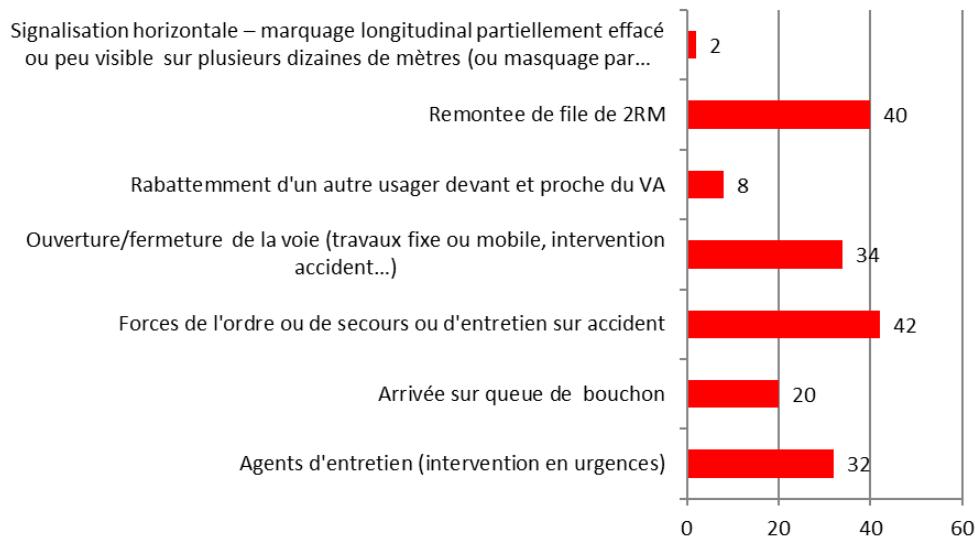


Figure n° 5 : Identification des scénarios critiques de niveau 5

Les usagers vulnérables très concernés par les niveaux de criticité élevés

Le premier constat qui est à faire concerne l'implication des usagers vulnérables dans les événements avec les criticités élevées. Ainsi pour les criticités de niveau 4 et 5, nous trouvons parmi les événements dont l'occurrence est la plus élevée ceux qui concernent les agents d'entretiens ou forces de l'ordre en intervention ainsi que les piétons sur la chaussée. Les 2 roues motorisés sont également très concernés par ces niveaux de criticité élevés.

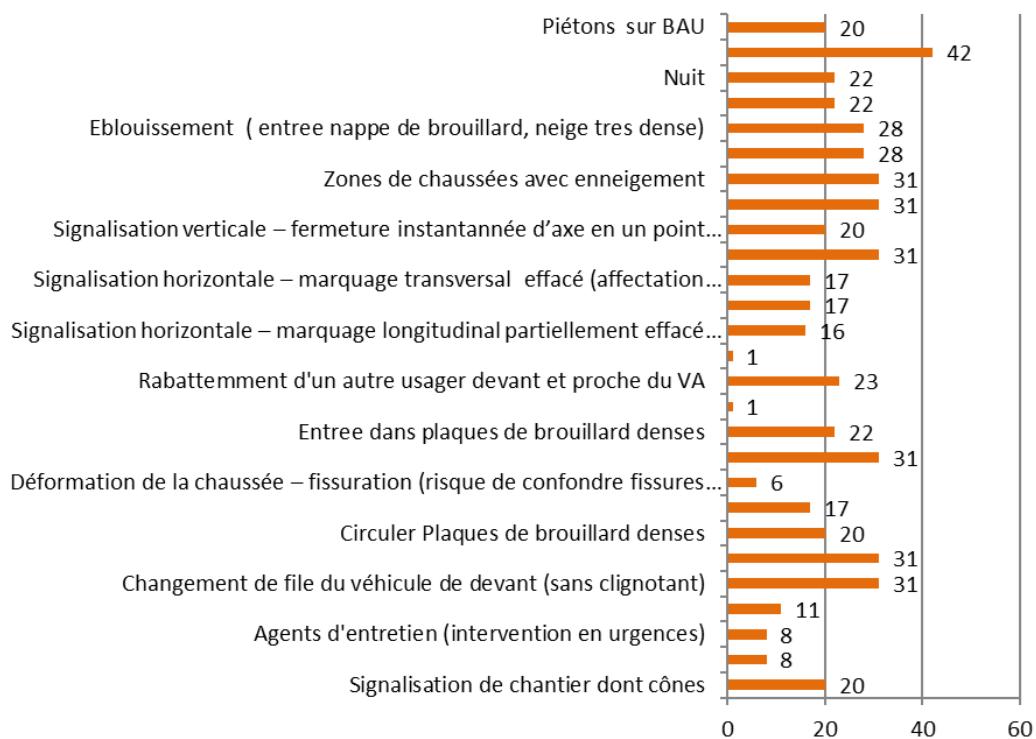


Figure n° 6 : Identification des scénarios critiques de niveau 4

Les événements liés aux interactions avec d'autres usagers roulants (Comportements infractionnels et dangereux d'autres usagers) concernés par les criticités élevées

Les événements liés aux interactions avec d'autres usagers roulants : Arrivée sur queue de bouchon, rabattement d'un autre usager devant et proche du VA, véhicule en insertion forçant le passage, dépassement par la droite...) ont également des occurrences très élevées pour les criticités de niveau 4 ou 5.

Les événements météo inopinés et dangereux

Les événements inopinés et dangereux liés à la météo tels que les éblouissements dus au brouillard ou à l'entrée/sortie de tunnel avec soleil rasant, les chaussées enneigées ou inondées ont également des occurrences très élevées pour les criticités de niveau 4 ou 5.

L'influence du trafic

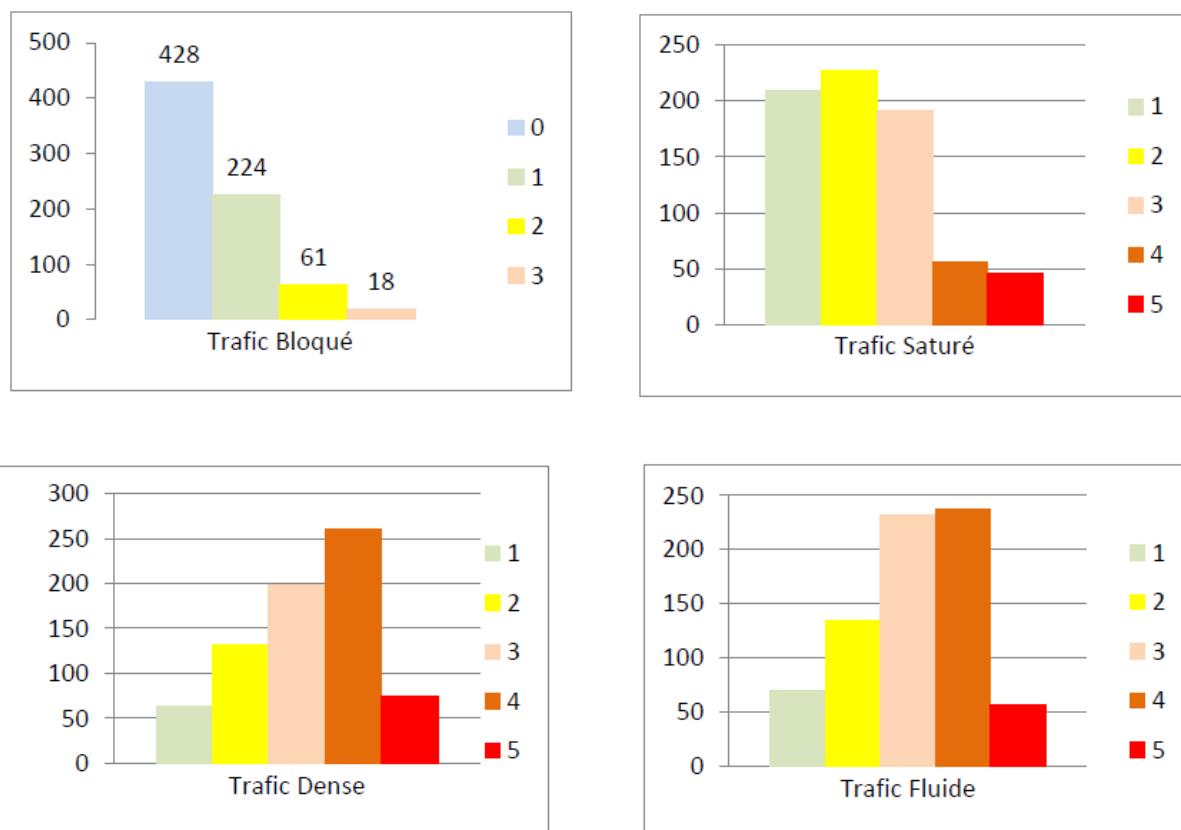


Figure n° 7 : Identification des scénarios critiques en fonction du trafic

Les quatre graphes de la figure 7 représentent, pour chacun des quatre niveaux de trafic (bloqué, saturé, dense et fluide), la répartition des niveaux de criticité pour tous les événements et situations de conduite. Ces graphiques montrent que les niveaux de criticité 4 et 5 sont plus prononcés sur les niveaux de trafic dense et fluide. En effet, la vitesse étant plus élevée sur ces niveaux de trafic, la sévérité d'un incident devient alors plus élevée ce qui conduit souvent à une criticité élevée pour les événements fréquents.

La méthodologie proposée a permis de réduire la combinatoire des événements rencontrés par l'introduction des événements génériques tout en proposant une approche assez large pour prendre en compte le maximum de situations de conduite. Cette approche descendante présente l'avantage de ne

pas considérer le problème en se basant sur des situations particulières mais en essayant d'avoir une approche systémique. Les scénarios critiques mis en priorité sont assez logiques du point de vue des experts du domaine de la sécurité routière et correspondent aux types d'accidents relevés sur les autoroutes françaises.

Les résultats de cette méthodologie sont donc en concordance avec les données accidentologiques. La méthode apporte en plus des informations sur la configuration de l'infrastructure, le type de trafic et les manœuvres en cours pour aider à la définition de scénarios plus précis.

4 CONCLUSION

L'incidentologie routière est née il y a 50 ans avec les techniques de conflits de trafic qui s'appuyaient sur des observations réalisées avec des dispositifs de recueil bord de voie. Son emploi se limitait donc à un nombre restreint de zones d'études (principalement des intersections). Les progrès technologiques ont ensuite permis d'embarquer des dispositifs d'enregistrement de l'activité de conduite dans des flottes de véhicules. Les chercheurs se sont emparés de cette opportunité pour investiguer l'intérêt d'utiliser ces dispositifs pour détecter des situations de conduite considérées comme dangereuses ou critiques mais n'ayant pas nécessairement dégénéré en accident corporel ou matériel : les incidents. Cela s'est traduit au cours de ces dernières années par le lancement de nombreuses expérimentations basées sur des moyens de recueil toujours de plus en plus sophistiqués et sur des flottes de véhicules de plus en plus importantes.

Les enseignements de ces expérimentations sont nombreux et variés.

- Même si les preuves scientifiques d'un lien fort entre accidentalité et incidentalité n'ont pas encore été apportées, de nombreuses études ont déjà démontré l'intérêt de disposer de données incidentologiques pour mieux appréhender l'insécurité routière et réduire le risque d'accident.
- Ces expérimentations pourront aussi tester le pouvoir de prédiction des méthodologies d'identification des scénarios critiques et les faire évoluer par l'ajout d'événements.

Porté par les progrès dans le domaine des capteurs, du « big data » ou encore de l'intelligence artificielle ainsi que par l'explosion de la connectivité des véhicules, la dynamique de recherche autour de l'incidentologie et des scénarios critiques ne devrait pas faiblir dans les années à venir.

Le véhicule automatisé sera un acteur majeur de cette dynamique. D'une part, il sera en capacité d'alimenter les chercheurs et ingénieurs avec une masse de données phénoménale. D'autre part, il en sera vraisemblablement le principal bénéficiaire notamment en matière d'algorithmes d'apprentissage.

5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Antin, J.F., Lee, S., Perez, M.A., Dingus, T.A., Hankey, J.M., Brach, A., 2019. Second strategic highway research program naturalistic driving study methods. *Saf. Sci.* 119, 2–10.
- Amundsen, Hydén - Proceedings: First Workshop on Traffic Conflicts, Oslo, 1977, p. 135
- Amundsen, F.A. & Hydén, C. (Eds.) (1977). Proceedings of First Workshop on Traffic Conflicts. Oslo, Norway: Institute of Transport Economics.
- Arun, A., Haque, M. M., Bhaskar, A., Washington, S., Sayed, T., 2021. A systematic mapping review of surrogate safety assessment using traffic conflict techniques, *Accid. Anal. & Prev.* Volume 153. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106016>.
- Aichinger, C., Nitsche, P., Stütz R., Harnisch, M., 2016. Using Low-cost Smartphone Sensor Data for Locating Crash Risk Spots in a Road Network. *Transportation Research Procedia*, Volume 14. Pages 2015-2024. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.169>.
- Bagdadi, O. & Varhelyi, A., 2011 . Jerkydrinving - An indicator of accident proneness?. *Accident Analysis and Prevention*, 43, 1359-1363.
- Bagdadi, O., 2013. Assessing safety critical braking events in naturalistic driving studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 16, 117-126.
- Bird, F., 1969. *Loss Control Management: Practical Loss Control Leadership*.
- Benmimoun, M. et al. (2011). Incident detection based on vehicle CAN-data within the large scale field operational test "euroFOT", 22nd Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV 2011), Washington, DC/USA.
- Dingus, T.A., Klauer S.G., Neale, V.L., Petersen, A., Lee, S.E., Sudweeks, J., Perez, M.A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z.R., Jermeland, J., Knipling, R. ,2006. The 100-Car Naturalistic Driving Study Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment, U.S. DOT HS 810 593. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC.
- Farmer, C.M., Kirley, B.B., Mccartt A.T., 2010. Effects of in-vehicle monitoring on the driving behavior of teenagers. *Journal of Safety Research*, 41, 39-45.
- Grimberg, E., Botzer, A., Musicant, O., 2020. Smartphones vs. in-vehicle data acquisition systems as tools for naturalistic driving studies: A comparative review. *Safety Science*, Volume 131, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104917>.
- Guo, F., Klauer, S.G., McGill, M.T., Dingus, T.A., 2010. Evaluating the Relationship Between Near-Crashes: Can Near-Crashes Serve as a Surrogate Safety Metric for Crashes? DOT HS 811 382. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC.
- Heinrich, H. W., 1931. *Industrial accident prevention : a scientific approach*, McGraw-Hill.
- ITS/AD-12-05/2: Comments for the outcome of 2nd ad-hoc meeting on automated vehicle level definitions. 2017, <https://globalautoregs.com/rules/199-automated-driving-and-autonomous-vehicles>

- Kuo, J., Lenné, M.G., Mulhall, M., Sletten, T., Anderson, C., Howard, M., Collins, A., 2019. Continuous monitoring of visual distraction and drowsiness in shift-workers during naturalistic driving. *Saf. Sci.* 119, 112–116. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.11.007>.
- Lechner, D., Perrin, C., 1996. Methodology to study the dynamic behaviour of the driver-vehicle system. In: Technical Paper R19.08 – FISITA 96 Congress, Praha (Czech Republic) June 17–21.
- Ledoux, V., Subirats, P., Violette, E., Bonin, Y., Serre T., Naude, C., Guilbot. M, Lechner, D., 2014. Using event data recorder to detect road infrastructure failures from a safety point of view. AET 2014-European Transport Conference 2014. 12p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01207860/document>
- Levick, N. & Swanson J., 2005 . An Optimal Solution for Enhancing Ambulance Transport Safety: A Real-Time Driver Performance Monitoring and Feedback Device. *Annals of Emergency Medicine*, 46, 112-113.
- McGehee, D.V., Raby, M., Carney, C., Lee, J.D., Reyes, M.L., 2007. Extending parental mentoring using an event-triggered video intervention in rural teen drivers. *J. Saf. Res.* 38 (2), 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.02.009>.
- Musicant, O., Tsippy, L., Toledo, T., 2007. Safety correlation and implications of an in-vehicle data recorder on driver behavior. TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers, Washington, DC:TRB.Naude, C., Serre, T., Dubois-Lounis, M., Fournier, J.-Y., Lechner, D., Guilbot, M., Ledoux, V., 2019. Vehicle dynamics data collection to characterize the drivers' behavior. *Accid. Anal. Prev.* 130, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.02.021>.
- Hankey, J.M., Perez, M.A., McClafferty, J.A., 2016. Description of the SHRP 2 naturalistic database and the crash, near-crash, and baseline data sets. VTTI Technical Reports. <http://hdl.handle.net/10919/70850>
- Nowakowski, C., S. E. Shladover, and C.-Y. Chan,. Determining the Readiness of Automated Driving Systems for Public Operation : Development of Behavioral Competency Requirements, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2559, 2016, pp65–72. <https://doi.org/10.3141/2559-08>.
- ONISR (Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière), 2020. La sécurité routière en France. Bilan de l'accidentalité de l'année 2019. Direction de l'information légale et administrative. Paris.
- Palat B., Saint Pierre G., Delhomme P., 2019. Evaluating individual risk proneness with vehicle dynamics and self-report data- toward the efficient detection of At-risk drivers. *Accid. Anal. Prev.* 123, 140-149
- Perez, M.A., Sudweeks, J.D., Sears, E., Antin, J., Lee, S., Hankey, J.M, Dingus, T.A, 2017. Performance of basic kinematic thresholds in the identification of crash and near-crash events within naturalistic driving data. *Accident Analysis & Prevention*, Volume 103, Pages 10-19 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.03.005>.
- Rasmussen J. Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics*, Vol. SMC-13, No. 3, 1983, pp. 257-266.
- SAE, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE Standard J3016, USA, 2016.

Schlummer, M., Althaus, D., Braasch, A., & Meyna, A. (2010). ISO 26262-The Relevance and Importance of Qualitative and Quantitative Methods for Safety and Reliability Issues Regarding the Automotive Industry. *Journal of KONBiN*, 14, 165.

Tattegrain-Veste H., Bellet T., Pauzié A. & Chapon A. (1996) Computational Driver Model in Transportation Engineering : COSMODRIVE. In *Transportation Research Board*, n° 1550 Operations and Safety, National Academic Press, Washington D.C., pp. 1-7.

Tattegrain H., Hedhli A., Aniss H. (2018) Identification et priorisation des situations critiques de cas d'usage du véhicule routier automatisé , Rapport DGITM , téléchargeable : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/vehicules-autonomes>

Toledo, T., Lotan, T., 2006. In-Vehicle Data Recorder for Evaluation of Driving Behavior and Safety. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1953, 112-119.

Toledo, T., Musicant, O. & Lotan, T., 2008. In-vehicle data recorders for monitoring and feedback on drivers' behavior. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16, 320-331.

Young, K.L., Osborne, R., Koppel, S., Charlton, J.L., Grzebieta, R., Williamson, A., Haworth, N., Woolley, J., Senserrick, T., 2019. What are Australian drivers doing behind the wheel? An overview of secondary task data from the Australian naturalistic driving study. *J. Australasian College Road Safe.* 30 (1), 27. <http://acrs.org.au/wp-content/uploads/What-are-Australian-drivers-doing-behind-the-wheel-Anoverview-of-secondary-task-data-from-the-Australian-Naturalistic-Driving-Study.pdf>.

Zheng, L., Sayed, T., Mannerling, F., 2021. Modeling traffic conflict for use in road safety analysis : A review of analytic methods and future directions. *Analytic Method in Accident Research*. 29. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2020.100142>

Zlocki, A., Eckstein, L., and Fahrenkrog, F. Evaluation and sign-off methodology for automated vehicle systems based on relevant driving situations, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.2489, 2015, pp. 123-129. <https://doi.org/10.3141/2489-14>