



Estimation de l'effet de l'introduction des véhicules autonomes sur la survenue d'accidents

Work Package	2
Responsable du WP, affiliation	Vincent LEDOUX (Cerema)
Livable n°	L2.7
Version	V3
Auteur responsable du livrable	Pilet Claire, UMRESTTE, Université Gustave Eiffel
Auteurs, affiliations	Pilet Claire, UMRESTTE, Université Gustave Eiffel Jean-Louis Martin, UMRESTTE, Université Gustave Eiffel
Relecteurs, affiliations	Manuelle Salathé, DSR Dominique Mignot, TS2, Université Gustave Eiffel Philippe Chrétien, CEESAR
Statut du livrable	Final

Veillez citer ce document de cette façon :

Pilet, C., & Martin, J.-L. (2020). Livrable L2.7 : *Estimation de l'effet de l'introduction des véhicules autonomes dans la survenue d'accidents*. Projet SURCA. 24 p.

Historique des versions			
Version	Date	Auteurs	Type des changements
1	31/01/2020	Claire Pilet, Jean-Louis Martin	
2	11/02/2020	Claire Pilet, Jean-Louis Martin	Prise en compte des corrections apportées par Philippe Chrétien : – le caractère systématiquement favorable des impacts évalués apparaît dès l'introduction, puisqu'il est constitutif de la question posée – le projet SURCA vise la Conduite Automatisée (CA), ce qui justifie l'hypothèse VA de niveau 5 à fonctionnement nominal idéalisé. – Citation de la question de la reprise en main, éludée grâce au niveau 5
3	14/02/2020	Claire Pilet, Jean-Louis Martin	Prise en compte des corrections apportées par Dominique Mignot: - Mention dans la méthode des accidents véhicules seuls - Annonce du tableau bilan par type d'accident
4	19/03/2020	Claire Pilet, Jean-Louis Martin	Mise en forme avec le template final du projet

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.



Résumé du projet Surca

Les questions posées par la cohabitation de véhicules de plus en plus automatisés avec des véhicules conventionnels et des usagers vulnérables, cyclistes, piétons, deux-roues motorisés, sont au cœur des préoccupations des décideurs publics, constructeurs, ou spécialistes de l'infrastructure routière et de la sécurité routière. Tous ont l'espoir que ces nouvelles technologies contribuent à améliorer la sécurité routière. L'objectif global du projet « Sécurité des Usagers de la Route et Conduite Automatisées, SURCA » est de contribuer à une meilleure intégration de la Conduite Automatisée dans la circulation actuelle.

Les partenaires du projet (Ifsttar, DSR, Ceesar, Cerema, Vedecom, Lab), ont ainsi comme objectif d'identifier quelles interactions existent et quelles stratégies pertinentes sont mises en place par les conducteurs pour proposer des recommandations aux concepteurs de véhicules autonomes sur les besoins en termes d'interactions et en termes de comportement du véhicule autonome. Pour cela, il est prévu d'analyser des bases de données existantes sur la conduite des véhicules conventionnels et d'identifier les facteurs qui peuvent expliquer des comportements différents.

Les connaissances issues de ces bases seront utilisables pour simuler l'introduction de la conduite automatisée de niveaux 3, 4 et 5, avec des taux de pénétration faibles. La gestion des interactions avec les autres usagers doit être réalisée dès que le véhicule peut évoluer en autonomie sans supervision du conducteur, quelles que soient la durée et les sections sur lesquelles cette automatisation sera possible. En cas de taux de pénétration très important, d'autres types d'interactions risquent de se mettre en place et devront alors être étudiés.

Ce projet est articulé autour de deux sous-thématiques :

- L'identification des scénarios d'interaction entre véhicules autonomes et autres usagers de la route (véhicules conventionnels, deux roues motorisés, cyclistes, piétons), avec un focus particulier sur les personnes âgées :
 - Etude des situations de négociation où les conducteurs gèrent cette interaction humaine, à partir de bases de données de conduite conventionnelle, et en utilisant des éléments difficilement émis et perçus par les systèmes automatisés (regard, connaissance a priori d'intention, etc.),
 - Etude de la réaction des autres usagers face à un véhicule autonome alors que son conducteur est absorbé dans une tâche annexe,
 - Identification des besoins de communication du véhicule autonome en phase active avec les autres usagers,
 - Analyse des besoins des usagers âgés et acceptabilité sociétale du véhicule autonome.
- L'étude des impacts de la posture des occupants (conducteur et passagers) d'un véhicule en mode autonome sur le risque lésionnel :
 - Choix des scénarios de simulation : positions des occupants, conditions de choc (lors de la réalisation de tâches annexes) et systèmes de retenue,
 - Evaluation des lésions potentielles par simulations numériques en fonction des systèmes de retenue (par ex. déploiement d'air bag),
 - Recommandations en termes de postures acceptables selon les différents systèmes de retenue.

Résumé de ce travail

Quel serait l'impact de l'introduction de véhicules autonomes dans la circulation ? C'est à cette question que le WP2.4 s'est attelé à répondre depuis le lancement du projet SURCA en juin 2018. L'objectif était plus précisément de quantifier, par la simulation, le nombre d'accidents potentiellement évités en fonction de différents taux de pénétration de véhicules automatisés (VA) de niveau 5 parmi les seuls véhicules légers.

En l'absence de données d'accidentalité en situation de conduite automatisée (CA) du fait que le roulage du VA est limité à l'expérimentation, nous avons substitué fictivement une certaine proportion des véhicules légers impliqués dans des accidents décrits dans la base de données VOIESUR par des véhicules automatisés de niveau 5, en leur appliquant les probabilités d'évitement de l'accident telles qu'estimées par un certain nombre de spécialistes des VA impliqués dans le projet.

Cette approche ne prend en compte que l'effet favorable des accidents potentiellement évités, et ne tient pas compte des autres effets, notamment sur le comportement humain, qui pourraient être défavorables : ce point est abordé dans le chapitre IV consacré à la discussion des résultats.

Une estimation du pourcentage d'accidents évités par configuration d'usager et selon trois taux de pénétration choisis a été réalisée, ainsi qu'une estimation tenant compte du poids relatif de ces configurations d'accident, ceci en séparant les accidents mortels des accidents corporels.

En tenant compte de l'ensemble des usagers de la route, et au-delà des nombreuses limites de notre approche, notre simulation suggère que l'on peut espérer une réduction de presque la moitié des accidents corporels et mortels en remplaçant tous les VL en circulation par des véhicules automatisés de niveau 5.

Ce résultat représente des perspectives encourageantes quant à l'introduction de véhicules automatisés dans la circulation tout en montrant clairement que, même avec des véhicules automatisés de niveau 5 fonctionnant de façon nominale, tout ne serait pas réglé pour autant.

Mots clés

Conduite automatisée (CA), Véhicule Automatisé de niveau 5 (VA), accidents de la circulation, simulation, taux de pénétration, avis d'experts

Table des matières

2	INTRODUCTION.....	8
2.1	CONTEXTE.....	8
2.2	DES CONTRIBUTIONS SUR LE SUJET TRÈS HÉTÉROGÈNES.....	8
2.3	ORIGINALITÉ ET APPORTS DE CETTE ÉTUDE	9
3	METHODE	9
3.1	BASE DE DONNÉES	9
3.2	DÉMARCHE GLOBALE	9
3.3	HYPOTHÈSE SUR LE VA	10
3.4	PICTOGRAMMES RETENUS	11
3.5	RÉCUPÉRATION ET TRAITEMENT DES INFORMATIONS DES EXPERTS	11
3.6	MISE EN PLACE DE L'ALGORITHME DE DÉCISION	12
3.7	MISE EN PLACE SOUS SAS	15
4	RESULTATS.....	15
4.1	POURCENTAGES D'ACCIDENTS ÉVITÉS PAR TYPE DE CONFIGURATION.....	15
4.2	POURCENTAGES D'ACCIDENTS ÉVITÉS PAR TYPE D'ACCIDENT	17
5	DISCUSSION	19
6	RÉFÉRENCES.....	21

Table des tableaux

TABEAU 1 : SPECIALISTES DU VA QUI ONT ESTIME LE ROLE DES VA SELON LES PICTOGRAMMES DECRIVANT LES ACCIDENTS OBSERVES	12
TABEAU 2 : POURCENTAGE MOYEN DES ACCIDENTS EVITES PAR CONFIGURATION ET PAR TAUX DE PENETRATION DU VA POUR LES ACCIDENTS CORPORELS	16
TABEAU 3 : POURCENTAGE MOYEN DES ACCIDENTS EVITES PAR CONFIGURATION ET PAR TAUX DE PENETRATION DU VA POUR LES ACCIDENTS MORTELS	16
TABEAU 4 : POURCENTAGE MOYEN DES ACCIDENTS EVITES PAR TAUX DE PENETRATION DU VA POUR LES ACCIDENTS CORPORELS	18
TABEAU 5 : POURCENTAGE MOYEN DES ACCIDENTS EVITES PAR TAUX DE PENETRATION DU VA POUR LES ACCIDENTS MORTELS	18

Table des figures

FIGURE 1 : EXTRAIT D'UNE RÉPONSE AU QUESTIONNAIRE VL/2RM	11
FIGURE 2 : ALGORITHME DE DÉCISION POUR LES CAS VL/PL-2RM-CYCLISTE-PIÉTON	12
FIGURE 3 : ALGORITHME DE DÉCISION POUR LES ACCIDENTS VL/VL	14

2 INTRODUCTION

2.1 Contexte

Les véhicules automatisés représentent de grands espoirs en termes de sécurité routière. La déclaration de Malte, issue de la conférence Ministérielle sur la sécurité routière de 2017, recommande « d'appuyer le développement de solutions compatibles véhicules automatiques et connectés ». La France s'est dotée de feuilles de route : plan Nouvelle France Industrielle qui concerne notamment le véhicule autonome ('Plan NFI : Objectifs de Recherche Véhicule Autonome - Mov'eo | Imagine Mobility' n.d.). Il y est prévu pour 2030 la circulation des véhicules autonomes dans le cadre de trajets réguliers et de voitures automatiques (solution de stationnement). Après 2030, c'est le tout automatique qui arriverait en circulation sur domaine public, dans le cadre de réglementations européennes.

C'est dans ce contexte politique international que le projet SURCA s'est donné pour objectif de contribuer à évaluer l'intégration progressive de la Conduite Automatisée (CA) dans la circulation actuelle.

La plupart des groupes de travail du projet SURCA s'intéressent à l'identification des interactions humaines et des stratégies pertinentes mises en place par les conducteurs selon les types d'utilisateurs en interaction. En nous appuyant sur une partie de ces contributions, nous nous proposons d'estimer le gain synthétique potentiel de l'effet de l'introduction des véhicules automatisés de niveau 5, de manière progressive, dans la circulation en nous centrant sur les scénarii accidentels connus, au niveau global.

2.2 Des contributions sur le sujet très hétérogènes

Bien que le véhicule automatisé soit l'objet d'un intérêt grandissant, les problématiques liées, les angles d'approche, les contextes, technologies et méthodologies appliqués à son sujet sont variés et l'impact global de son introduction demeure encore peu étudié.

Une recherche, menée en novembre 2019 sur Web of Science, avec l'algorithme de recherche ci-dessous, cantonné au titre et aux contributions en anglais, donnait 91 résultats.

(TI=((automat* or autonom*) and (vehicl* or car or engine or driv*)) and (impact or prevision or number or figure or estimat* or simulat* or benefit* or threat*) and (crash* or crash* or security or safety or traffic))

Une revue de la littérature réalisée par Yue L en 2018 (Yue et al. 2018), sur les véhicules à bas niveaux d'automatisation, relève que les études sur l'impact sur les bénéfices en termes de sécurité de ces véhicules ne comprennent pas toujours toutes les technologies et pointe ce fait comme une limite majeure. Les études incluses dans cette revue présentent une grande hétérogénéité dans les résultats avec un impact, en termes d'accidents évités, allant de 2% à 64%.

Concernant les études portant sur des niveaux plus élevés d'automatisation, nous faisons face à la difficulté de l'hétérogénéité des indicateurs retenus pour mesurer cet impact: bénéfices en termes de flux de circulation (Calvert, Schakel, and van Lint 2017), sur la sécurité (Antona-Makoshi et al. 2018), sur la réaction de ces véhicules dans un certain contexte (Figueiredo et al. 2009)... Certains auteurs

annoncent une baisse de 90% des accidents en s'appuyant sur la proportion de l'erreur humaine comme origine des accidents (Fagnant and Kockelman 2015).

En termes de méthode, certaines études utilisent des données d'observation de VA en circulation dans les zones autorisées (Texas, Californie (Favarò et al. 2017)...) ou dans des milieux expérimentaux isolés, ce qui n'est pas une situation naturelle. D'autres, utilisent la simulation notamment grâce à des logiciels permettant de faire circuler des véhicules automatisés de niveau 5 fictifs (Ye and Yamamoto 2019) ou via des simulateurs de conduite (Suh et al. 2016), ou pour intégrer des hypothèses sur des données réelles de circulation standard (Althoff and Mergel 2011).

2.3 Originalité et apports de cette étude

Notre objectif est de quantifier l'impact global, sur le nombre d'accidents corporels et mortels, de l'introduction de véhicules ayant un niveau d'automatisation élevée (niveau 5, qui correspondrait à une « automatisation complète » ('SAE International Releases Updated Visual Chart for Its "Levels of Driving Automation" Standard for Self-Driving Vehicles' n.d.)). En l'absence de données sur la circulation de ce type de véhicule, nous allons substituer fictivement une certaine proportion des véhicules légers impliqués dans des accidents décrits dans une base de données par des véhicules automatisés de niveau 5, en leur appliquant les probabilités d'évitement de l'accident telles qu'estimées par un certain nombre de spécialistes des VA impliqués dans le projet.

Les résultats sont produits à l'échelle du territoire national métropolitain, et concernent tous les différents types d'usagers en potentiel conflit avec des VA, sur toutes les infrastructures routières, et dans tous les scénarii accidentels observés sur une année. Ils permettront d'avoir une première quantification de l'introduction de ces véhicules, à partir d'hypothèses de comportements de ces VA formulées par des experts, et sous réserve d'hypothèses fortes explicitées dans la méthodologie.

3 METHODE

3.1 Base de données

Cette étude a été conduite en utilisant les données de la base VOIESUR (projet ANR, Véhicule Occupant Infrastructure Etudes de la Sécurité des Usagers de la Route). Cette base contient tous les accidents mortels de France métropolitaine de 2011, 1/20 des accidents corporels du territoire métropolitain, ainsi que tous les accidents corporels survenus dans le Rhône en 2011.

Les 8541 accidents inclus dans la base VOIESUR ont été renseignés et codés à la suite de la lecture exhaustive des procès-verbaux réalisés par les forces de l'ordre. Elle contient donc une information riche, tant par son nombre que par sa finesse. Nous avons notamment pu utiliser les variables « pictogramme » et « situation accidentelle ». Les pictogrammes nous ont notamment permis de nous entendre avec les experts sur les circonstances de l'accident, tandis que la variable « situation accidentelle » nous a permis de situer le véhicule léger et l'utilisateur sur chaque pictogramme.

3.2 Démarche globale

Nous avons choisi de raisonner par configuration d'accident, en lien avec les WP 2 à 6 de Surca.

D'une part, nous appliquons une méthode de simulation sur les accidents à 2 impliqués « actifs » incluant au moins un véhicule léger. Il s'agit donc des items 2 à 6 dans la liste ci-dessous :

- 1 Accidents seuls
 - a. Véhicule léger (VL)
 - b. Autre
- 2 **Accidents VL/piéton**
- 3 **Accidents VL/cycliste**
- 4 **Accidents VL/Deux-roues-motorisées (2RM)**
- 5 **Accidents VL/VL**
- 6 **Accidents VL/Poids-lourds (PL)**
- 7 Accidents à 2 impliqués sans VL
- 8 Accidents à 3 antagonistes ou plus

Pour ces cinq cas étudiés, nous introduisons, par tirage aléatoire, des VA de niveau 5 à la place des véhicules légers conventionnels selon différents taux de pénétration : 10%, 50% et 100%.

Par accident, selon le résultat du tirage sur la présence d'un VA, un algorithme est appliqué pour déterminer l'effet du VA selon le pictogramme.

Nous estimons ensuite le pourcentage d'accidents évités par configuration, d'une part, en séparant les cas mortels des cas corporels, et globalement selon le poids des configurations en opérant toujours la séparation entre les cas mortels et les cas corporels. Nous estimons également le pourcentage d'accidents non traités (pas d'information collectée sur le pictogramme ou positionnement du VA selon la situation accidentelle impossible).

D'autre part, pour les autres configurations, seuls les accidents n'impliquant qu'un seul véhicule léger (configuration 1.a) ont été traités, ceux-ci étant considérés comme ne se produisant plus dès lors que le véhicule est automatisé (en lien avec le § C). Pour les cas où aucun véhicule léger n'est présent dans l'accident, l'introduction du VA n'aura donc aucun effet (configurations 1.b et 7). La configuration 8 sur les accidents à trois antagonistes ou plus est non traitée du fait de sa complexité.

Enfin, nous présentons un tableau bilan sur le pourcentage d'accidents évités par type d'accident, corporel ou mortel, avec la prise en compte du poids relatif des configurations présentées. Les cas des véhicules légers seuls et des accidents à 2 impliqués « actifs » sont présentés, les autres cas étant considérés comme non traités. La somme de ces deux configurations nous permet de donner un pourcentage global d'accidents évités, toutes configurations confondues, pour les cas corporels d'une part et mortels d'autre part.

3.3 Hypothèse sur le VA

Nous avons décidé de travailler sur un véhicule qui serait toujours en conduite automatisée, donc un VA de niveau 5. Selon la SAE, le VA de niveau 5 est « autonome » en toutes circonstances. En effet, un niveau 4 d'automatisation nous aurait obligé à préciser les circonstances de reprise en main qui sont génératrices de risques spécifiques, réclamant un accord avec les experts. Cela n'aurait pas permis d'évaluer l'impact de ces véhicules automatisés en toutes circonstances.

Egalement, nous avons choisi de travailler sur un VA « idéal ». Ce véhicule « idéal » répond bien aux lois de la physique, mais est imaginé sans défaut et ne commettant pas d'erreur. Ainsi, des dysfonctionnements spécifiques liés à l'automatisation ne sont pas considérés. Ceci nous permet de

poser l'hypothèse que les accidents de véhicules légers seuls, en l'absence d'interaction avec un autre usager, ne se produiront pas quand il s'agira de véhicules automatisés

3.4 Pictogrammes retenus

Les pictogrammes ont été sélectionnés selon leur fréquence d'apparition dans la base VOIESUR et leur pertinence concernant la conduite automatisée. Ce travail a été effectué par les experts dans le cadre d'autres WP du projet. Les pictogrammes non retenus qui apparaîtraient dans nos configurations sont notés « non traités ».

43 pictogrammes ont été retenus pour le cas des véhicules légers, 43 également pour les deux-roues motorisés, 17 pour les poids-lourds, 27 pour les cyclistes et 28 pour les piétons. Au final un peu plus de 70 pictogrammes différents servent à décrire les 5 configurations précédemment définies.

3.5 Récupération et traitement des informations des experts

Des questionnaires spécifiques à chaque configuration ont été transmis aux experts. Il est demandé pour chaque pictogramme de situer le véhicule autonome, et, en fonction de cette situation du VA, de dire si l'accident aurait toujours lieu, s'il sera systématiquement évité, ou s'il se produira avec une certaine probabilité (exprimée en « combien de fois sur 10 »). Voir l'exemple de questionnaire ci-dessous.

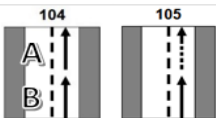
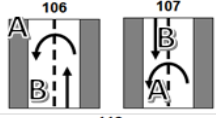
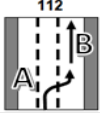
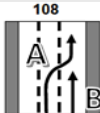
	A	☒ Oui	☐ Non	10	fois sur 10
	B	☐ Oui	☒ Non		fois sur 10
	A	☒ Oui	☐ Non	2	fois sur 10
	B	☒ Oui	☐ Non	2	fois sur 10
	A	☐ Oui	☒ Non		fois sur 10
	B	☒ Oui	☐ Non	10	fois sur 10
	A	☐ Oui	☒ Non		fois sur 10
	B	☒ Oui	☐ Non	5	fois sur 10

Figure 1 : Extrait d'une réponse au questionnaire VL/2RM

Le cas des accidents impliquant des piétons diffère dans la mesure où la position des piétons est explicite sur les pictogrammes.

Nous avons reçu 13 contributions au total, se répartissant comme ci-après selon les configurations.

Tableau 1 : Spécialistes du VA qui ont estimé le rôle des VA selon les pictogrammes décrivant les accidents observés

Configuration	Contributeur(s)
Deux roues motorisées/VL	Philippe Chrétien, Nicolas de Rus, Reakka Krishnakumar, Isabelle Ragot-Court, Thierry Serre, Eric Violette
Véhicule léger/VL	Thierry Bellet, Vincent Judalet
Poids-lourd/VL	Vincent Judalet
Cycliste/VL	Philippe Chrétien, Thierry Serre
Piéton/VL	Philippe Chrétien, Thierry Serre

Pour permettre de prendre en compte le panel des avis des experts, sauf pour le cas Poids-lourds/véhicule léger pour lequel nous avons eu une seule contribution, nous avons décidé de retenir, pour les simulations, la prévision la plus défavorable et la prévision la plus favorable quant à l'impact du VA.

3.6 Mise en place de l'algorithme de décision

Pour toutes les configurations hors cas VL/VL, deux possibilités se présentent selon la nature du véhicule léger issue du tirage.

1. le véhicule léger en cause dans l'accident n'est pas automatisé et donc il y a accident
2. le véhicule léger est bien un VA et donc la prise en compte des réponses des experts est intégrée.
 - Soit le véhicule léger peut gérer l'accident, L'expert a répondu « Non » à la question « L'accident aura-t-il toujours lieu ? » et donc il n'y a pas d'accident.
 - Soit l'expert a répondu que le véhicule automatisé de niveau 5 était sans effet en répondant qu'il y aurait toujours accident, et ceci 10 fois sur 10, et donc l'accident se produit
 - Soit l'expert a répondu qu'il n'y aurait qu'une certaine proportion d'accidents qui seraient bien gérés par le VA. Nous avons réalisé un tirage aléatoire pour déterminer la survenue de l'accident ou non selon cette proportion.

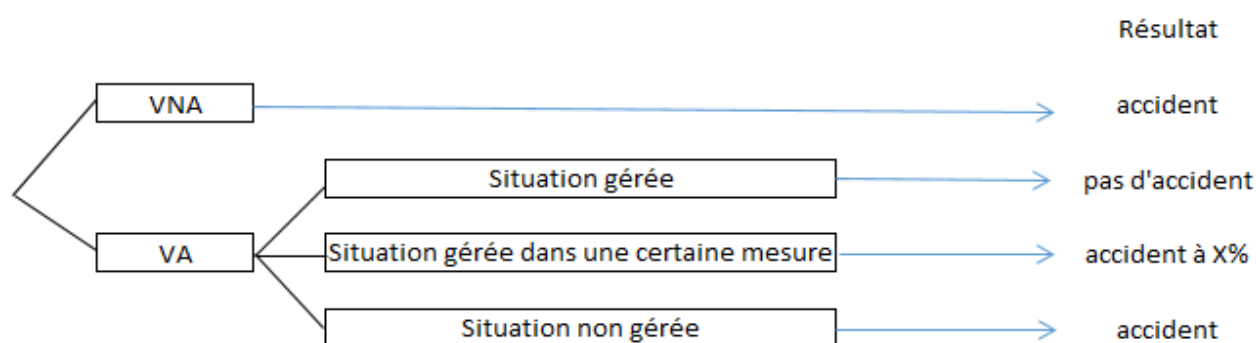


Figure 2 : Algorithme de décision pour les cas VL/PL-2RM-Cycliste-Piéton

Dans le cas de la configuration véhicule léger/véhicule léger, l'algorithme intègre les 2 antagonistes de l'accident et donc il peut y avoir :

1. aucun véhicule autonome, l'accident a lieu
2. un VA, nous nous retrouvons dans la même situation que pour les configurations précédentes : l'accident a lieu ou non selon la réponse des experts (3 cas possibles : gestion de la situation nulle, complète ou avec une certaine probabilité)
3. deux VA, la survenue de l'accident dépend des capacités des VA à gérer la situation en fonction du pictogramme et de leur position respective.
 - Il suffit d'un seul VA qui gère la situation 10 fois sur 10 pour que l'accident n'ait pas lieu
 - Si aucun ne gère, l'accident a bien lieu

Si les 2 VA gèrent la situation moins de 10 fois sur 10, la probabilité que l'accident se produise est égale au produit des deux probabilités (hypothèse d'indépendance de comportement des deux véhicules).

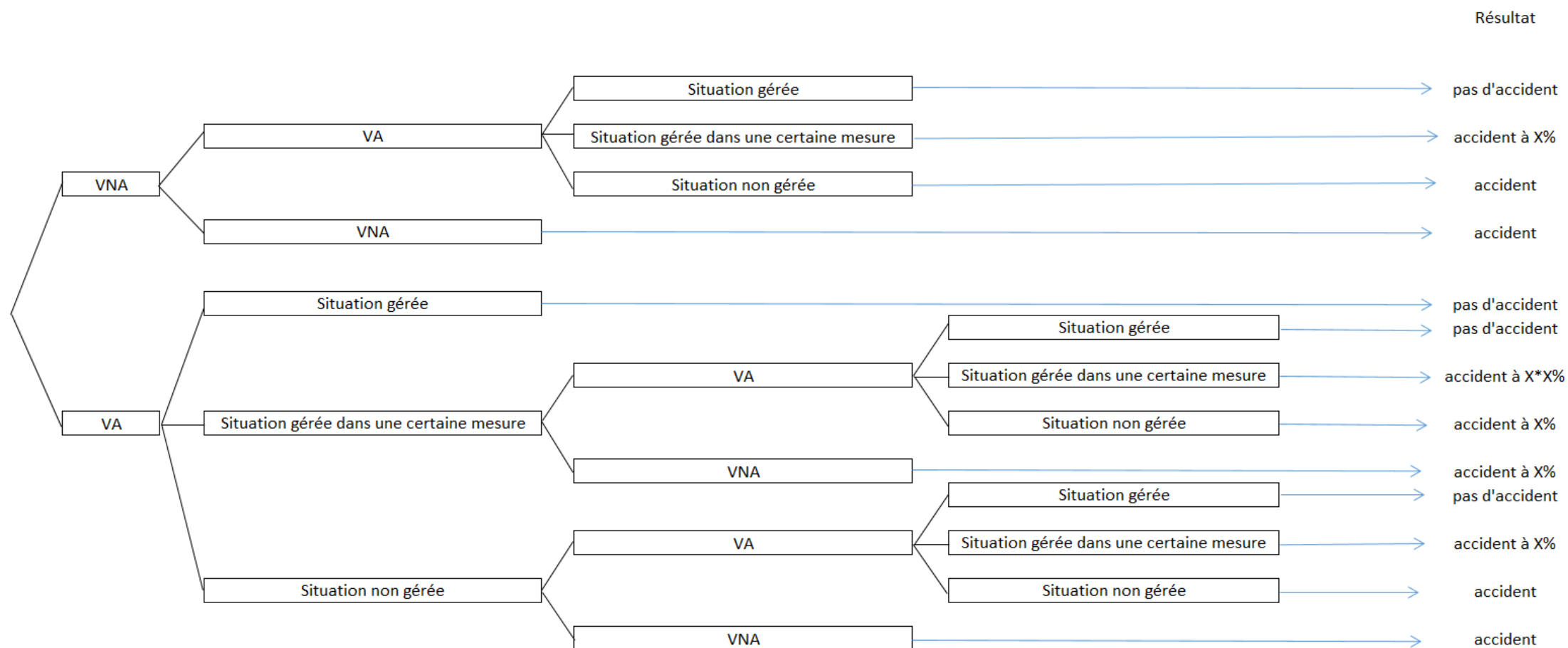


Figure 3 : Algorithme de décision pour les accidents VL/VL

3.7 Mise en place sous SAS

Le logiciel SAS, version 9.4 a été utilisé pour toute la réalisation de l'étude : gestion de données, tirages au sort, mise en place de l'algorithme, calculs des résultats, calculs des moyennes et autres statistiques sur l'ensemble des tirages. Concrètement, les étapes réalisées sont détaillées ci-dessous.

Pour chaque configuration d'accident, une sous-table correspondant aux configurations d'accidents prises en compte a été réalisée.

100 tirages aléatoires selon une loi uniforme ont été réalisés, 2 fois selon chaque taux (non exhaustif), de pénétration du VA (10%, 50%) pour déterminer la nature du véhicule léger (automatisé de niveau 5 ou conventionnel). La variable VA est mise à 1 si la valeur donnée par la loi uniforme est inférieure ou égale à 0.1 pour le taux de 10% et à 0.5 pour le taux de 50%, sinon elle est mise à 0.

Nous intégrons les réponses des experts, en indiquant les 2 probabilités retenues (cas le plus favorable et cas le plus défavorable aux effets du VA) associées à chaque pictogramme et position du VA.

Des sous-tables par configuration ont été réalisées, lorsque la probabilité de survenue de l'accident avec un VA diffère de 0 ou de 1, et ceci pour chaque niveau de probabilité. 100 tirages aléatoires selon une loi uniforme ont été réalisés.

Sur chaque tirage, la mise en place de l'algorithme est réalisée, donnant pour chaque usager impliqué un résultat de 0 ou 1 quant à sa contribution à l'accident. Ensuite, une table de synthèse par accident est créée. Dans la mesure où il suffit d'un seul usager qui gère la situation pour que l'accident n'ait plus lieu, la présence d'un zéro pour l'un des 2 usagers entraîne l'évitement de l'accident et donc la variable accident associée à chaque tirage sera dans ce cas à 0 et 1 sinon.

Nous calculons ensuite pour chaque configuration, le pourcentage d'accidents évités pour chaque taux de pénétration. Nous calculons la moyenne des tirages de ce pourcentage, par taux de pénétration, et son écart-type.

Dans un deuxième temps, nous appliquons les poids relatifs des configurations (en séparant les accidents corporels des accidents mortels) aux pourcentages moyens obtenus afin d'obtenir une vision plus globale de l'impact de l'introduction du VA.

4 RESULTATS

4.1 Pourcentages d'accidents évités par type de configuration

La simulation de l'introduction du VA dans la circulation amène (par construction) à une réduction des accidents, variable et croissante selon le taux de pénétration de la technologie. On observe dans les Tableaux Tableau 2Tableau 3 que cette réduction est globalement supérieure pour les accidents corporels que pour les accidents mortels, sauf pour la configuration VL/PL.

	NT	Moy D	Moy F	NT D	NT F	Moy D	Moy F	NT D	NT F	Moy D	Moy F	NT D	NT F	Moy D	Moy F	NT	Moy
--	----	-------	-------	------	------	-------	-------	------	------	-------	-------	------	------	-------	-------	----	-----

Tableau 2 : Pourcentage moyen des accidents évités par configuration et par taux de pénétration du VA pour les accidents corporels

10		2,3%	4,9%			4,5%	5,9%			6,4%	11,3%			7,4%	8,5%		2,7%
50	8,2%	11,5%	24,4%	31,1%	27,7%	19,76	25,11	10,5%	9,3%	27,0%	45,1%	9,2%	9,5%	31,5%	35,7%	18,3%	11,0%
100		23,0%	49,0%			34,5%	39,5%			41,6%	61,1%			49,5%	54,3%		16,7%
	sur 100% d'accidents corporels VL/Piéton			sur 100% d'accidents corporels VL/Cycliste				sur 100% d'accidents corporels VL/2RM				sur 100% d'accidents corporels VL/VL				sur 100% d'accidents corporels VL/PL	

NT= Non traités ; NT D= Non traités dans le cas des hypothèses les plus défavorables aux effets du VA ; NT F= Non traités dans le cas des hypothèses les plus favorables aux effets du VA ; Moy D=Moyenne dans le cas des hypothèses les plus défavorables à l'effet du VA ; Moy F=Moyenne dans le cas des hypothèses les plus favorables à l'effet du VA

Tableau 3 : Pourcentage moyen des accidents évités par configuration et par taux de pénétration du VA pour les accidents mortels

%VA	VL/Piéton			VL/Cycliste				VL/2RM				VL/VL				VL/PL	
	NT	Moy D	Moy F	NT D	NT F	Moy D	Moy F	NT D	NT F	Moy D	Moy F	NT D	NT F	Moy D	Moy F	NT	Moy
10		1,3%	3,2%			1,9%	3,6%			2,6%	4,7%			3,9%	5,1%		7,1%
50	5,4%	6,5%	15,9%	2,8%	1,8%	8,4%	14,2%	0,7%		11,8%	19,4%	0,9%		18,1%	22,2%	5,9%	31,9%
100		12,9%	31,7%			14,5%	21,2%			19,6%	26,9%			32,9%	34,9%		56,6%
	sur 100% d'accidents mortels VL/Piéton			sur 100% d'accidents mortels VL/Cycliste				sur 100% d'accidents mortels VL/2RM				sur 100% d'accidents mortels VL/VL				sur 100% d'accidents mortels VL/PL	

NT= Non traités ; NT D= Non traités dans le cas des hypothèses les plus défavorables aux effets du VA ; NT F= Non traités dans le cas des hypothèses les plus favorables aux effets du VA ; Moy D=Moyenne dans le cas des hypothèses les plus défavorables à l'effet du VA ; Moy F=Moyenne dans le cas des hypothèses les plus favorables à l'effet du VA

Pour un taux de pénétration du VA de 10%, le pourcentage d'accidents évités est compris entre 2.3% dans le cas le plus défavorable pour la configuration VL/Piéton et jusqu'à 11.3% dans le cas le plus favorable pour la configuration VL/2RM dans le cas des accidents corporels. Pour les accidents mortels, l'impact le moins élevé reste la configuration VL/Piéton dans le cas défavorable (1.3%) mais la variation selon les configurations est moins ample. La configuration qui profite le plus de l'introduction des VA est VL/PL avec 7.1% d'accidents évités.

L'introduction de VA à hauteur de 50% des VL en circulation entraîne des effets plus variés selon les configurations que précédemment avec 11% pour les VL/PL contre 45.1% pour les VL/2RM dans les cas corporels, et 6.5% pour les VL/Piéton contre 31.9% pour les VL/PL pour les cas mortels. Cet écart se creuse, avec un taux de pénétration à 100%, avec 16.7% pour les VL/PL jusqu'à 61.1% pour les VL/2RM pour les cas corporels et 12.9% pour les VL/Piéton jusqu'à 56.6% pour les VL/PL pour les cas mortels.

Nos résultats ont fait l'objet d'une analyse de sensibilité aux tirages de positionnement du VA et de gestion de la situation. Ils s'avèrent très stables pour les 100 tirages. L'écart-type de ces pourcentages moyens varie de 0.057 à 2.062. Le détail de ces écarts-types par tirage et configuration est fourni en annexe (Annexe 1).

La variation de l'impact de l'introduction est également sensible aux avis des experts : cas défavorable et favorable à l'effet du VA. La configuration des accidents VL/piéton s'avère particulièrement sensible à l'expertise : nous observons un rapport supérieur à 2 entre les cas favorable et défavorable, qu'il s'agisse des accidents corporels ou mortels, à 10, 50 ou 100% de pénétration. Il en va de même pour la configuration VL/2RM avec un ratio de l'ordre de 1,6, de même que pour les VL/cycliste mortels. Les configurations VL/VL sont moins dispersées en fonction de la vision des experts avec un écart favorable / défavorable de l'ordre de 10% : on peut retenir un gain situé entre 49,5 et 54,3% des accidents corporels VL/VL avec 100% de VA, soit 2 fois moins d'accidents VA/VA que d'accidents VL/VL en mode conventionnel.

4.2 Pourcentages d'accidents évités par type d'accident

Nous avons ensuite regardé l'impact de cette introduction progressive du VA dans la circulation sur l'ensemble des accidents corporels d'une part et mortels d'autre part. Le poids de chaque configuration est indiqué en annexe (Annexe 2).

Ainsi, comme indiqué dans les tableaux ci-dessous, une fois le poids relatif de chaque configuration pris en compte, les accidents qui ont fait l'objet de l'application de l'algorithme (accidents à 2 antagonistes impliquant un VL) ne permettent qu'une réduction des accidents de 3.4% à 5.3% des accidents corporels pour un taux de pénétration de 10%, de 14.9% à 22,2% pour un taux de pénétration à 50%, et de 24.3% à 34.3% pour un taux de pénétration à 100%.

Tableau 4 : Pourcentage moyen des accidents évités par taux de pénétration du VA pour les accidents corporels

% VA	Accidents VL seul	Accidents à 2 antagonistes impliquant un VL				Autres cas non traités	Total				sur 100% des accidents corporels
		NT D	NT F	Moy D	Moy F		NT D	NT F	Moy D	Moy F	
10	1,2%			3,4%	5,3%				4,6%	6,4%	
50	5,9%	7,4%	7,0%	14,9%	22,2%	22,9%	30,3%	30,0%	20,8%	28,1%	
100	11,8%			24,3%	34,3%				36,1%	46,1%	

NT D= Non traités dans le cas des hypothèses les plus défavorables aux effets du VA ; NT F= Non traités dans le cas des hypothèses les plus favorables aux effets du VA ; Moy D=Moyenne dans le cas des hypothèses les plus défavorables à l'effet du VA ; Moy F=Moyenne dans le cas des hypothèses les plus favorables à l'effet du VA

Comme, par hypothèse, la part des accidents de véhicules légers seuls disparaît également, globalement, l'impact de l'introduction du VA dans la circulation permettrait d'éviter 4.6% des accidents corporels dans le cas le plus défavorable aux effets du VA pour un taux de pénétration à 10%, et jusqu'à 46.1% des accidents corporels pour le cas le plus favorable aux effets du VA et un taux de pénétration à 100% de la technologie.

Tableau 5 : Pourcentage moyen des accidents évités par taux de pénétration du VA pour les accidents mortels

% VA	Accidents VL seul	Accidents à 2 antagonistes impliquant un VL				Autres cas non traités	Total				sur 100% des accidents mortels
		NT D	NT F	Moy D	Moy F		NT D	NT F	Moy D	Moy F	
10	2,7%			1,5%	2,2%				4,2%	4,9%	
50	13,6%	1,4%	1,4%	7,1%	9,9%	25,5%	26,9%	26,9%	20,6%	23,4%	
100	27,1%			12,7%	16,5%				39,8%	43,6%	

NT D= Non traités dans le cas des hypothèses les plus défavorables aux effets du VA ; NT F= Non traités dans le cas des hypothèses les plus favorables aux effets du VA ; Moy D=Moyenne dans le cas des hypothèses les plus défavorables à l'effet du VA ; Moy F=Moyenne dans le cas des hypothèses les plus favorables à l'effet du VA

Pour les accidents mortels, l'impact du VA est moins marqué que pour les cas corporels du fait de pourcentages d'accidents évités plus faibles (sauf pour le cas VL/PL). Pour les accidents concernant 2 antagonistes actifs dont un véhicule léger, l'introduction du VA permettrait d'éviter 1.5% des accidents mortels dans le cas le plus défavorable pour 10% de VA en circulation et jusqu'à 16,5% dans le cas le plus favorable aux effets du VA et pour une flotte entièrement autonome.

Les accidents seuls de véhicules légers représentent une part plus importante des accidents mortels : 27.1% des accidents mortels correspondent à des véhicules légers seuls impliqués. Ainsi, leur disparition par hypothèse engendre une contribution plus forte des accidents VL seuls et permet globalement une performance du VA du même ordre de grandeur que pour les accidents corporels, avec des pourcentages d'accidents évités variant de 4.2% pour le cas le plus défavorable et un taux de pénétration à 10% jusqu'à 43.6% avec les hypothèses les plus favorables aux effets du VA et une flotte entièrement autonome.

5 DISCUSSION

A propos de l'historique du projet, la méthode utilisée n'est pas celle qui avait été prévue initialement, basée sur un modèle de responsabilité. En effet, nous avons tenté d'interroger les experts sur l'effet du VA sur les différentes variables de ce modèle (par exemple : refuser la priorité, réaliser un dépassement dangereux, gestion d'une forte pluie, changement de file, virage à gauche...). A part sur les variables concernant des comportements interdits ou anormaux (non-respect du code de la route entre autres), les experts ne pouvaient pas se positionner du fait du manque de contexte. C'est pour cette raison que nous avons décidé d'opter pour une autre méthode et ceci d'autant plus que les pictogrammes avaient fait l'objet d'un travail commun et d'un consensus au sein du projet.

Notre travail a pu être mené sur la base VOIESUR qui présente l'intérêt d'avoir utilisé une nomenclature de pictogrammes permettant de décrire la quasi-totalité des circonstances de chaque accident. Cependant, cette base est constituée d'accidents qui ont eu lieu en France métropolitaine pour l'année 2011. Ainsi les résultats que nous présentons ont de la valeur si les circonstances accidentelles varient peu au cours du temps, et si leurs importances relatives restent également stables. La question se serait posée également si nous avions disposé de données plus récentes, puisque l'introduction massive des VA de niveau 5, si elle se réalise, ne sera effective que dans de nombreuses années.

Concernant les hypothèses que nous posons pour évaluer l'impact de l'introduction du véhicule automatisé de niveau 5 dans la circulation, celles-ci sont fortes et restrictives et engendrent plusieurs limites à notre travail :

Tout d'abord, nous ne sommes pas en mesure d'anticiper des comportements spécifiques envers les VA de la part des autres usagers. Il n'y a donc pas prise en compte ici d'accidents supplémentaires spécifiques à la circulation des VA du fait d'un changement d'attitude des autres usagers. Cette prise en compte fait l'objet d'autres analyses dans le cadre du projet Surca.

Il en va de même pour des accidents spécifiques au VA, causés par lui-même : pannes spécifiques liées à l'automatisation, comportements inadaptés à certaines situations, problèmes de reprise en main... Ainsi on peut imaginer que dans un certain nombre de situations, l'introduction d'un VA, même de niveau 5, peut avoir un effet délétère. Un tel effet n'a pas pu être pris en compte dans notre méthodologie.

Nous avons également posé l'hypothèse forte qu'un véhicule automatisé ne pouvait pas être seul à l'origine d'un accident en l'absence d'interaction avec un autre usager.

Il découle de ces restrictions que nos résultats doivent surestimer l'effet bénéfique des VA, notamment lorsque le parc sera mixte, associant véhicules conventionnels et automatisés.

A contrario, nous n'avons pas pu prendre en compte la possibilité que, grâce à la présence d'un VA, un accident se produise tout de même, mais à une vitesse d'impact plus faible, certains accidents mortels devenant des corporels, et certains accidents corporels devenant matériels. Ceci conduirait ainsi à une sous-estimation de l'effet bénéfique des VA. Il en va de même pour les cas non-traités. Si l'effet de l'introduction du VA sera bien nul concernant les accidents n'impliquant pas de véhicule léger, il devrait

y avoir un effet positif (augmentation des accidents évités) sur le cas des accidents à plus de 2 antagonistes impliquant un VL.

Une limite de ce travail est que nous sommes dans l'incapacité d'estimer l'importance relative de ces sur et sous-estimations.

Par ailleurs, la variabilité des 100 estimations réalisées étant faible, nous avons jugé que le nombre d'itérations effectuées était satisfaisant. La sensibilité aux différents avis d'experts est beaucoup plus forte, et dépend grandement de la configuration d'accident. Elle est en particulier faible pour la configuration VL/VL, et très importante pour les accidents avec piéton, traduisant ainsi des écarts d'appréciation des experts. Etant donnés les poids des configurations VL/VL et VL seul, les écarts d'estimations pour l'ensemble des configurations sont cependant suffisamment faibles pour fournir des résultats utiles.

Finalement, nous obtenons un impact du véhicule automatisé de niveau 5 qui est bien croissant selon le taux d'introduction dans la circulation. Cependant, même avec 100% de VA en circulation nous n'obtenons pas le résultat de 90% d'accidents évités annoncé par Fagnant and Kockelman. Tous les usagers de la route ne seront effectivement pas automatisés (usagers de deux-roues, piétons...) et certaines situations ne permettront pas au VA de réagir pour permettre l'évitement de la situation, même si ce véhicule automatisé de niveau 5 est le véhicule « autonome idéal ». Il faut d'ailleurs noter qu'une fois tous les VL transformés en véhicules automatisés de niveau 5, le nombre d'accidents VL/VL est seulement divisé par 2, avec une bonne convergence entre les experts (dispersion de 10% sur les gains).

En conclusion, et avec toutes les restrictions énoncées ci-dessus, notre simulation suggère qu'on peut espérer une réduction de presque la moitié des accidents corporels et mortels en remplaçant tous les VL en circulation par des VA.

Ce résultat représente des perspectives encourageantes quant à l'introduction de véhicules automatisés dans la circulation tout en montrant clairement que ce déploiement doit être réalisé prudemment, car même avec des véhicules automatisés de niveau 5, fonctionnant « idéalement », tout ne serait pas réglé pour autant.

6 RÉFÉRENCES

- Althoff, Matthias, and Alexander Mergel. 2011. 'Comparison of Markov Chain Abstraction and Monte Carlo Simulation for the Safety Assessment of Autonomous Cars'. *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12 (4): 1237–47. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2157342>.
- Antona-Makoshi, Jacobo, Sou Kitajima, Keisuke Shimono, Nobuyuki Uchida, and Jun Tajima. 2018. 'A Novel Multi-Agent Traffic Simulation Model to Predict the Impact of Automated Vehicles on Traffic Safety'. *Traffic Injury Prevention* 19 (sup2): S185–S185. <https://doi.org/10.1080/15389588.2018.1532235>.
- Calvert, S. C., W. J. Schakel, and J. W. C. van Lint. 2017. 'Will Automated Vehicles Negatively Impact Traffic Flow?' *Journal of Advanced Transportation*, UNSP 3082781. <https://doi.org/10.1155/2017/3082781>.
- Fagnant, Daniel J., and Kara Kockelman. 2015. 'Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations'. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77 (July): 167–81. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>.
- Favarò, Francesca M., Nazanin Nader, Sky O. Eurich, Michelle Tripp, and Naresh Varadaraju. 2017. 'Examining Accident Reports Involving Autonomous Vehicles in California'. Edited by Xiaosong Hu. *PLOS ONE* 12 (9): e0184952. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184952>.
- Figueiredo, Miguel C., Rosaldo J. F. Rossetti, Rodrigo A. M. Braga, and Luis Paulo Reis. 2009. *An Approach to Simulate Autonomous Vehicles in Urban Traffic Scenarios*. New York: Ieee.
- 'Plan NFI : Objectifs de Recherche Véhicule Autonome - Mov'eo | Imagine Mobility'. n.d. Accessed 27 January 2020. <https://pole-moveo.org/appels/plan-nfi-objectifs-de-recherche-vehicule-autonome/>.
- 'SAE International Releases Updated Visual Chart for Its "Levels of Driving Automation" Standard for Self-Driving Vehicles'. n.d. Accessed 16 December 2019. <https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-%E2%80%9Clevels-of-driving-automation%E2%80%9D-standard-for-self-driving-vehicles>.
- Suh, Jongsang, Kyongsu Yi, Jiyeol Jung, Kyungjun Lee, Hyokjin Chong, and Bongchul Ko. 2016. 'Design and Evaluation of a Model Predictive Vehicle Control Algorithm for Automated Driving Using a Vehicle Traffic Simulator'. *Control Engineering Practice* 51 (June): 92–107. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.03.016>.
- Ye, Lanhang, and Toshiyuki Yamamoto. 2019. 'Evaluating the Impact of Connected and Autonomous Vehicles on Traffic Safety'. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications* 526 (July): 121009. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.245>.
- Yue, Lishengsa, Mohamed Abdel-Aty, Yina Wu, and Ling Wang. 2018. 'Assessment of the Safety Benefits of Vehicles' Advanced Driver Assistance, Connectivity and Low Level Automation Systems'. *Accident Analysis and Prevention* 117 (August): 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.04.002>.

ANNEXES

Table des annexes

ANNEXE N° 1 : ECARTS-TYPES DES POURCENTAGES MOYENS DES ACCIDENTS ÉVITÉS PAR CONFIGURATION ET PAR TAUX DE PÉNÉTRATION DU VA	24
ANNEXE N° 2 : RÉPARTITION DES % DE CONFIGURATIONS OBSERVÉES DANS VOIESUR.....	24

Annexe n° 1 : Ecart-types des pourcentages moyens des accidents évités par configuration et par taux de pénétration du VA

		VL/Piéton		VL/Cyclistes		VL/2RM		VL/VL		VL/PL
		écart-type P	écart-type M	écart-type P	écart-type M	écart-type P	écart-type M	écart-type P	écart-type M	écart-type
corporels	10	0,409	0,530	1,063	1,343	0,645	0,835	0,690	0,810	0,726
	50	0,788	0,858	2,017	2,059	0,871	1,016	0,937	0,947	1,054
	100	0,946	0,393	2,062	1,540	0,668	0,268	0,493	0,124	0,396
mortels	10	0,296	0,473	0,713	1,094	0,394	0,465	0,479	0,526	1,302
	50	0,631	0,706	1,293	1,385	0,608	0,603	0,747	0,743	1,918
	100	0,927	0,318	2,062	0,554	0,416	0,087	0,352	0,057	0,617

Annexe n° 2 : Répartition des % de configurations observées dans VOIESUR

	VL seul	Autre véhicule seul	VL / piéton	VL /cycliste	VL / 2RM	VL /VL	VL /PL	autres cas à 2	à plus de 2
corporels	11,8%	8,0%	17,7%	4,9%	21,9%	18,3%	2,5%	8,8%	6,2%
mortels	27,1%	11,5%	13,8%	2,2%	10,2%	14,4%	6,9%	7,4%	6,6%

Les colonnes en gras indiquent les configurations qui ont fait l'objet d'estimations selon les avis des experts. Elles représentent 65,3% du total des accidents corporels, et 47,4% des accidents mortels.