



Commission économique pour l'Europe

Comité des transports intérieurs

**Forum mondial de l'harmonisation
des Règlements concernant les véhicules****187^e session**

Genève, 21-24 juin 2022

Point 2.3 de l'ordre du jour provisoire

**Systemes de transport intelligents et coordination
des activités relatives aux véhicules automatisés****Proposition de deuxième version du document de référence
de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai
de la conduite automatisée****Communication du Groupe de travail des véhicules
automatisés/autonomes et connectés***

Le texte ci-après a été adopté par le Groupe de travail des véhicules automatisés/autonomes et connectés (GRVA) à sa douzième session (voir ECE/TRANS/WP.29/GRVA/12, par. 24). Il est fondé sur le document informel GRVA-12-12. Il est soumis au Forum mondial de l'harmonisation des Règlements concernant les véhicules (WP.29) et au Comité d'administration de l'Accord de 1958 (AC.1) pour examen à leurs sessions de juin 2022.

* Conformément au programme de travail du Comité des transports intérieurs pour 2022 tel qu'il figure dans le projet de budget-programme pour 2022 (A/76/6 (Sect. 20), par. 20.76), le Forum mondial a pour mission d'élaborer, d'harmoniser et de mettre à jour les Règlements ONU en vue d'améliorer les caractéristiques fonctionnelles des véhicules. Le présent document est soumis en vertu de ce mandat.



I. Contexte

1. À sa 178^e session, le Forum mondial de l'harmonisation des Règlements concernant les véhicules (WP.29) de la Commission économique pour l'Europe (CEE) a adopté le document-cadre sur les véhicules automatisés/autonomes (ECE/TRANS/WP.29/2019/34/Rev.2) et établi le mandat du groupe de travail informel des méthodes de validation pour la conduite automatisée (ECE/TRANS/WP.29/1147, annexe VI).
2. Parmi les mesures prévues par le document-cadre figurait la mise au point d'une « nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée », aux fins de son examen par le WP.29 à sa 183^e session (mars 2021).
3. Conformément au document-cadre, le mandat précisait que la tâche du groupe de travail informel des méthodes de validation pour la conduite automatisée (groupe VMAD), relevant du GRVA, consistait à élaborer des méthodes d'évaluation, y compris des scénarios, pour valider le niveau de sécurité des systèmes automatisés en se fondant sur plusieurs composantes : audit et évaluation, simulations et essais virtuels, essais sur piste et essais en conditions réelles.
4. Le mandat soulignait que le groupe de travail informel VMAD devait, dans le cadre de ses activités :
 - a) Se conformer aux principes et éléments suivants, décrits dans le document-cadre du WP.29 sur les véhicules autonomes :
 - i) S'agissant de la fonction de détection d'objets et d'événements et de réaction à ceux-ci (OEDR) (évaluation) : un véhicule automatisé/autonome doit être en mesure de détecter les objets et les événements dont la présence ou la survenance peut raisonnablement être escomptée dans le domaine de conception fonctionnelle, et d'y réagir ;
 - ii) S'agissant de la validation du niveau de sécurité du système : le constructeur du véhicule devrait démontrer qu'il a mis en place des modalités appropriées de conception et de validation fondées sur l'ingénierie des systèmes en vue de concevoir des systèmes de conduite automatisés exempts de risques déraisonnables et respectant les règles de circulation routière ainsi que les principes énumérés dans le présent document. Les méthodes de conception et de validation devraient comprendre une analyse et une évaluation des risques pour la sécurité propres au système de conduite automatisé, à la fonction OEDR ainsi qu'à la conception générale du véhicule auquel le système doit être intégré et, le cas échéant, à l'ensemble de l'écosystème des transports. Elles devraient également mettre en évidence le comportement attendu du véhicule automatisé/autonome dans des conditions normales de fonctionnement, en situation d'évitement d'une collision et dans les cas de mise en œuvre des stratégies de secours. Les méthodes d'essai peuvent quant à elles comprendre une combinaison de simulations, d'essais sur piste et d'essais sur route.
 - b) Tenir pleinement compte des résultats des travaux des autres groupes de travail relevant du WP.29 et de leurs groupes de travail informels ;
 - c) Se pencher sur les données, les activités de recherche et les normes techniques existantes (SAE International et Organisation internationale de normalisation (ISO)) pour élaborer ses propositions ;
 - d) À sa 183^e session, en mars 2021, le WP.29 a adopté la première version de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai, sous la forme d'un document de référence relatif à la validation des systèmes de conduite automatisés. À cette même session, il a été demandé qu'une deuxième version soit établie pour examen à la session de mars 2022 du WP.29, en vue de régler les questions en suspens et de tenir compte des résultats des travaux du groupe de travail informel des prescriptions fonctionnelles applicables aux véhicules automatisés et autonomes (groupe FRAV), s'ils étaient disponibles ;
 - e) Le groupe VMAD et ses sous-groupes ont depuis lors poursuivi leurs travaux sur le document de référence. La présente version du document rend compte de l'état d'avancement des travaux à la fin du mois d'octobre 2021 et servira à alimenter les débats

du GRVA à sa session de janvier 2022. Parallèlement à cela, les travaux se poursuivront sur un nombre limité de questions.

II. Objectif et champ d'application

5. Afin que la communauté internationale puisse tirer le meilleur parti des avantages potentiels des systèmes de conduite automatisés en matière de sécurité, il est nécessaire d'établir un cadre de validation du niveau de sécurité de ces systèmes qui puisse être adopté par les Parties contractantes aux Accords de 1958 et de 1998 concernant les Règlements ONU applicables aux véhicules. La nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée élaborée par le groupe VMAD vise à fournir des orientations précises pour valider le niveau de sécurité d'un système de conduite automatisé d'une manière qui soit reproductible, objective et factuelle, tout en restant neutre sur le plan technologique et suffisamment souple pour favoriser l'innovation continue dans l'industrie automobile.

6. Le présent document fait la synthèse des travaux accomplis à ce jour par le groupe VMAD concernant la mise au point de cette nouvelle méthode. Il donne une vue d'ensemble claire de la nouvelle méthode et de ses principales composantes. Il contribue également à faciliter la coordination des activités du groupe VMAD et du groupe FRAV, qui relèvent tous les deux du GRVA. Cette coordination sera la garantie que la nouvelle méthode prend également en compte la validation de la conformité d'un système de conduite automatisé aux prescriptions de sécurité communes qui seront élaborées par le groupe FRAV.

7. Compte tenu de l'important travail technique qu'il reste à accomplir pour mettre en œuvre la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée, la présente version du document de référence fournit un cadre de haut niveau pour cette méthode et décrit :

a) La portée du catalogue de scénarios et des différentes composantes (simulations et essais virtuels, essais sur piste, essais en conditions réelles, audit et évaluation, et surveillance en fonctionnement), ainsi qu'un aperçu de ces éléments ;

b) Le processus d'ensemble de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée, c'est-à-dire la manière dont les modules de la méthode (le catalogue de scénarios et les composantes) s'articulent pour produire un résultat efficace, complet et cohérent.

8. Le présent document sera enrichi et régulièrement mis à jour en fonction des conclusions des futures sessions du groupe VMAD.

9. Il sera mis à jour afin d'intégrer les résultats des travaux du groupe VMAD, qui continue à élaborer les éléments de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée, ainsi que ceux du groupe FRAV, qui poursuit la mise au point des prescriptions de sécurité relatives aux systèmes de conduite automatisés. La documentation technique détaillée sera présentée dans un index des pièces justificatives, situé à la fin du présent document, au fur et à mesure de son élaboration par le groupe VMAD.

10. Dans les conditions prévues par le GRVA et le WP.29, une fois que la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée aura atteint une maturité permettant de définir des critères d'évaluation (fondés sur les prescriptions fonctionnelles précisées par le groupe FRAV), le présent document (ainsi que les ressources connexes élaborées par le groupe VMAD) devrait servir à éclairer la mise au point de lignes directrices relatives au processus de validation ou de règlement et de prescriptions répondant aux besoins des Parties aux Accords de 1958 et de 1998 (sous réserve de l'approbation du WP.29).

III. Définitions

11. L'introduction des systèmes de conduite automatisés et des technologies connexes a entraîné une prolifération de nouveaux termes et concepts techniques. Dans un souci de cohérence, un glossaire des termes utilisés dans le document de référence de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée est proposé à l'annexe I.

Ce glossaire sera enrichi et mis à jour en permanence, au fur et à mesure de l'élaboration du document de référence et des documents techniques justificatifs. Au besoin, le groupe VMAD veillera à la cohérence du glossaire avec les termes adoptés par le WP.29, le GRVA et d'autres groupes de travail informels du GRVA, y compris s'agissant des définitions arrêtées par le groupe FRAV.

IV. Mise en œuvre d'une approche à plusieurs composantes pour la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée

12. La nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée a pour objet de fournir un cadre permettant d'évaluer un système de conduite automatisé ainsi que son comportement et la sécurité de son fonctionnement en conditions réelles.

13. L'évaluation de ces capacités est une tâche très complexe qu'il est impossible de mener à bien de manière exhaustive et efficace en recourant à une seule méthode de validation. Par conséquent, le groupe VMAD a proposé que soit adoptée, pour la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée, une approche à plusieurs composantes, à savoir un catalogue de scénarios et cinq méthodes de validation (composantes), chacune d'entre elles étant examinée plus en détail dans les sections suivantes du présent document :

a) Catalogue de scénarios

14. Ensemble de descriptions de situations de conduite réelles qui peuvent se produire au cours d'un trajet, le catalogue de scénarios sera utilisé par les composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée pour valider le niveau de sécurité d'un système de conduite automatisé ;

b) Simulations et essais virtuels

15. Cette composante fait appel à différentes chaînes de simulation pour évaluer la conformité d'un système de conduite automatisé aux prescriptions de sécurité sur un large éventail de scénarios virtuels, dont certains seraient extrêmement difficiles, voire impossibles, à tester en situation réelle. La crédibilité de la simulation et des essais virtuels est prise en considération ;

c) Essais sur piste

16. Ils se déroulent sur un terrain d'essai fermé à la circulation et mettent en œuvre différents éléments de scénario pour tester les capacités et le fonctionnement d'un système de conduite automatisé ;

d) Essais en conditions réelles

17. Ils se déroulent sur la voie publique et permettent de tester et d'évaluer les performances du système de conduite automatisé s'agissant de sa capacité à rouler dans des conditions réelles de circulation ;

e) Procédures d'audit et d'évaluation

18. Ces procédures définissent la manière dont les constructeurs devront démontrer les capacités d'un système de conduite automatisé aux autorités chargées de la sécurité, en s'appuyant sur des documents, des simulations et des essais sur piste ou en conditions réelles. L'audit permet de valider que les dangers et les risques propres au système ont été recensés et qu'un processus cohérent d'intégration de la sécurité dès la phase de conception (sécurité par conception) a été établi. Il permet également de vérifier que les procédures, mécanismes et stratégies (c'est-à-dire le système de gestion de la sécurité) mis en place garantissent que le système de conduite automatisé satisfait aux prescriptions de sécurité pertinentes tout au long du cycle de vie du véhicule. L'audit examine aussi la complémentarité entre les différentes composantes de l'évaluation et l'exhaustivité des scénarios ;

f) Surveillance en fonctionnement et notification

19. Cette composante a trait à la sécurité de fonctionnement du système de conduite automatisé après sa mise sur le marché. Elle s'appuie sur la collecte de données relatives au parc automobile pour déterminer si le système de conduite automatisé reste sûr lorsqu'il est utilisé sur route. Cette collecte peut également servir à alimenter la base de données commune des scénarios et permettre à l'ensemble des spécialistes des systèmes de conduite automatisés de tirer des enseignements des accidents et incidents majeurs dans le contexte visé.

V. Catalogue de scénarios

A. Pourquoi inclure dans la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée des essais reposant sur des scénarios ?

20. Afin de porter à son maximum le niveau de sécurité potentiel des véhicules automatisés/autonomes, il convient d'établir un solide cadre de validation de ce niveau de sécurité. Ce cadre devrait fournir des orientations précises pour valider les prescriptions de sécurité applicables aux véhicules automatisés/autonomes d'une manière reproductible, objective et factuelle, et neutre sur le plan technologique.

21. Au stade actuel, relativement peu avancé, de la mise au point des véhicules automatisés/autonomes, une grande partie de la littérature existante fait appel à des indicateurs tels que la distance parcourue en conditions réelles sans collision, sans infraction ou sans désactivation du système de conduite automatisé du véhicule pour dresser un bilan de la situation.

22. Des mesures simples telles que la distance parcourue sans collision, sans infraction ou sans désactivation peuvent être utiles pour éclairer le débat public sur les progrès généraux accomplis dans le développement des véhicules automatisés/autonomes. Toutefois, ces indicateurs ne suffisent pas à eux seuls à prouver aux organismes de réglementation internationaux qu'un véhicule automatisé/autonome sera capable de gérer en toute sécurité le vaste éventail de situations auxquelles un véhicule peut raisonnablement être confronté.

23. Certains observateurs ont suggéré qu'un véhicule automatisé/autonome devrait parcourir des milliards de kilomètres dans le monde réel pour qu'on puisse prouver que ses performances de sécurité sont nettement supérieures à celles d'un conducteur humain (Kalra et Paddock, 2016). Faire appel à ce type d'essai pour valider le niveau de sécurité serait coûteux et chronophage, sans compter qu'il serait impossible de reproduire les tests ultérieurement. Sachant qu'il est nécessaire de valider les véhicules automatisés/autonomes dans diverses situations, différents scénarios de circulation devraient être envisagés.

24. L'approche fondée sur des scénarios contribue à organiser les activités de validation du niveau de sécurité systématiquement et d'une manière efficace, objective, reproductible et évolutive ; elle constitue un élément essentiel de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée en ce qu'elle permet d'assurer une couverture globale et exhaustive des situations de circulation.

25. La validation fondée sur des scénarios consiste à reproduire des situations réelles qui sollicitent et mettent à l'épreuve les capacités d'un véhicule équipé d'un système de conduite automatisé à fonctionner en toute sécurité.

B. Qu'est-ce qu'un scénario de circulation ?

26. Un scénario de circulation est une description d'une ou plusieurs situations de conduite réelles qui peuvent se produire au cours d'un trajet. Le sous-groupe 1 du groupe VMAD concevra des scénarios à utiliser avec l'une des composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée. Un scénario peut comporter de nombreux éléments, tels que le tracé de la route, les types d'usagers de la route, des objets statiques ou présentant différents comportements dynamiques, et diverses conditions environnementales (entre autres facteurs).

Note : On entend par trajet le déplacement d'un véhicule sur une voie de circulation, de son point de départ à sa destination.

27. Comme indiqué précédemment, on peut recourir à des scénarios dans le cadre de différentes méthodes d'essai, telles que les simulations et les essais virtuels, les essais sur piste ainsi que les essais en conditions réelles. Ces méthodes, qui présentent chacune des avantages et des inconvénients spécifiques, forment ensemble une architecture de test multiforme. Par conséquent, il peut être préférable de tester certains scénarios en utilisant certaines méthodes d'essai plutôt que d'autres.

28. Le groupe VMAD établira par la suite un catalogue de scénarios à utiliser pour valider, à l'aide des composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée, chaque prescription de sécurité – établie par le groupe FRAV – relative à un système de conduite automatisé. L'idéal serait que les scénarios reflètent de manière exhaustive les situations rencontrées sur les voies publiques du monde entier. En réalité toutefois, chaque scénario choisi pour tester le système de conduite automatisé devra refléter les conditions particulières (par exemple, la configuration de la route ou le sens de la circulation sur une voie donnée) propres au domaine de conception fonctionnelle dans lequel le système est conçu pour fonctionner. Les scénarios devront être adaptés aux fonctionnalités du système de conduite automatisé à valider. À titre d'exemple, une fonctionnalité conçue uniquement pour la conduite sur autoroute ne sera pas soumise à un scénario comportant des changements de direction aux intersections. En outre, le système de conduite automatisé devant être en mesure de réagir aux actions des autres usagers de la route susceptibles de rendre un accident inévitable, les scénarios ne devraient pas se limiter aux situations que le système est censé pouvoir gérer. Ce travail sera accompli en consultation avec les sous-groupes du groupe VMAD.

29. Si des scénarios absents du catalogue sont mis en évidence et jugés utiles, il conviendra de les y intégrer.

30. Il est prévu que le catalogue soit doté d'étiquettes permettant de rechercher tous les scénarios correspondant aux attributs de tel ou tel domaine de conception fonctionnelle (une taxonomie normalisée sera mise en place à cet effet) et aux comportements attendus.

C. Recensement des scénarios

31. Les méthodes de validation fondées sur des scénarios doivent comprendre un ensemble adéquat, représentatif et exhaustif de scénarios pertinents, critiques et complexes de façon à permettre de valider efficacement un système de conduite automatisé. Différentes approches sont utilisées pour recenser les scénarios permettant de valider le niveau de sécurité d'un véhicule automatisé/autonome, par exemple :

a) L'analyse du comportement du conducteur, y compris l'évaluation des données de circulation en conditions réelles ;

b) L'analyse des données de collisions, telles que celles figurant dans les bases de données des forces de l'ordre et des compagnies d'assurance ;

c) L'analyse des caractéristiques de la circulation dans des domaines de conception fonctionnelle spécifiques (par exemple, en enregistrant et en analysant le comportement des usagers de la route aux intersections) ;

d) L'analyse des données recueillies par les capteurs du système de conduite automatisé (accéléromètre, caméra, radar et système GPS, par exemple) ;

e) L'utilisation d'un véhicule de mesure spécialement conçu, d'un équipement de surveillance sur site, de drones, etc. pour collecter diverses données sur le trafic (y compris sur les autres usagers de la route) ;

f) L'exploitation des connaissances et de l'expérience acquises pendant la mise au point du système de conduite automatisé ;

g) L'utilisation de scénarios générés automatiquement à partir des variations des paramètres clefs ;

h) L'utilisation de scénarios élaborés en s'appuyant sur les prescriptions de sécurité fonctionnelle et sur le niveau de sécurité de la fonction en question.

32. L'exhaustivité du catalogue de scénarios, à savoir les cas pris en compte par rapport au nombre total de cas, est importante si l'on veut apprécier l'utilité dudit catalogue. S'agissant de l'exhaustivité, il est primordial que le catalogue comprenne des scénarios permettant de faire face à toutes les conditions dans un large éventail de domaines de conception fonctionnelle (par exemple, des configurations urbaines, autoroutières et rurales, divers facteurs météorologiques, etc.). En ce qui concerne la crédibilité de la validation fondée sur des scénarios auxquels est soumis le système de conduite automatisé, les scénarios propres à un domaine de conception fonctionnelle doivent s'appuyer sur une réflexion précise et ample à propos des situations de conduite réelles liées à ce domaine et dont on peut raisonnablement attendre qu'elles se produisent.

33. Les comportements dangereux d'autres usagers de la route (un conducteur roulant à contre-sens, ou la traversée soudaine de la chaussée par un piéton, par exemple), s'ils sont raisonnablement prévisibles, doivent être pris en compte dans le catalogue des scénarios. Cela ne signifie pas pour autant que toutes les collisions seront évitées, car les exigences pour un système de conduite automatisé dépendent de la situation et du niveau de sécurité requis.

34. Les scénarios propres à chaque pays ne doivent pas être négligés ; il convient de les prendre en compte à terme dans le catalogue de scénarios.

35. La collecte continue de données réelles est importante pour dresser l'inventaire des scénarios inattendus, c'est-à-dire des scénarios qui peuvent poser un problème inédit au système de conduite automatisé d'un véhicule donné.

36. Une fois qu'un large éventail de scénarios a été répertorié, il est possible de tester et de valider les prescriptions en procédant à des essais virtuels, sur piste ou en conditions réelles. Pour recenser les scénarios pertinents, il pourra être fait appel aux domaines de conception fonctionnelle et aux comportements attendus.

D. Classification des scénarios

37. La quantité d'informations incluses dans un scénario peut être considérable. Par exemple, la description d'un scénario peut contenir des informations concernant un grand nombre d'actions, de caractéristiques et d'éléments différents, tels que des objets (des véhicules ou des piétons, par exemple), des routes et des environnements, ainsi que des séquences de décision préétablies et les principaux événements susceptibles de se produire au cours du scénario. Il est donc essentiel d'établir un langage normalisé et structuré pour décrire les scénarios, afin que les différentes parties prenantes du secteur des véhicules autonomes/automatisés comprennent leurs objectifs respectifs, l'objet des scénarios et les capacités des systèmes de conduite automatisés. À cette fin, il est recommandé d'avoir recours à un modèle, lequel permet de s'assurer que les informations incluses dans un scénario sont cohérentes et de réduire au minimum le risque de confusion dans leur interprétation.

38. Sans pour autant constituer un modèle, l'une des approches adoptées par les chercheurs consiste à décrire les scénarios à différents niveaux d'abstraction et de précision, sur la base de trois catégories : scénarios fonctionnels, logiques et concrets.

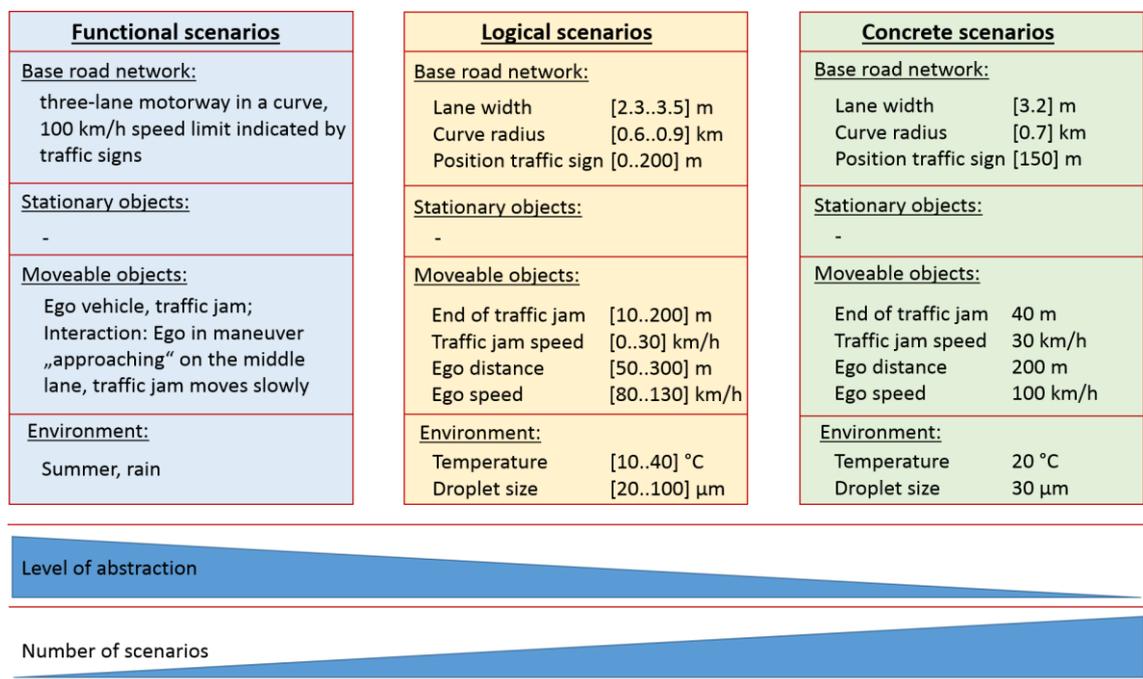
a) Scénarios fonctionnels : Les scénarios de cette catégorie présentent le niveau d'abstraction le plus élevé. Ils tracent les grandes lignes du concept fondamental du scénario en donnant par exemple une description sommaire des actions du véhicule soumis à l'essai (ou véhicule sujet), des interactions dudit véhicule avec les autres usagers de la route et les objets, de la géométrie de la route et des autres éléments du scénario (les conditions environnementales, par exemple). Cette approche s'appuie sur un langage accessible pour décrire la situation et les éléments correspondants. Au niveau du catalogue, un tel langage (naturel et non technique) doit être normalisé de sorte que les différents acteurs du secteur des véhicules automatisés aient une même compréhension des scénarios.

b) Scénarios logiques : Les chercheurs génèrent un scénario logique en sélectionnant des intervalles de valeurs ou des distributions de probabilité pour chaque élément du scénario fonctionnel (par exemple, la plage de largeur de la voie, exprimée en mètres). La description du scénario logique couvre tous les éléments et les prescriptions techniques nécessaires à la mise en œuvre d’un système capable de gérer ce type de scénario.

c) Scénarios concrets : Les scénarios concrets sont établis en sélectionnant des valeurs spécifiques pour chaque élément. Cette étape permet de s’assurer qu’un scénario de test donné est reproductible. Par ailleurs, il est possible de concevoir une infinité de scénarios concrets pour chaque scénario logique comportant des plages de valeurs continues, ce qui permet de s’assurer que le véhicule est exposé à une grande variété de situations.

d) La figure 1 ci-après donne des exemples de scénarios fonctionnels, logiques et concrets.

Figure 1
Évolution d’un scénario au cours des différentes étapes de son élaboration (Pegasus, 2018)



E. Éléments des scénarios

39. Les scénarios de circulation sont établis en combinant un certain nombre d’éléments pertinents appartenant à des couches distinctes qui décrivent de manière systématique l’espace dans lequel se déroulent les scénarios.

40. Les scénarios fonctionnels applicables aux routes à chaussées séparées sont décrits à l’annexe II. Le présent document doit être considéré comme un document évolutif, ce qui signifie qu’il devrait en principe être mis à jour à la lumière des discussions en cours et qu’il ne s’agit pas de la version définitive.

Note : Après les scénarios fonctionnels, il est naturel de passer à un niveau d’abstraction inférieur. Ainsi, il est envisagé d’inclure également dans l’annexe II certains scénarios logiques, ou certaines de leurs descriptions envisageables, comme convenu dans le cadre de la discussion en cours.

F. Utilisation des scénarios et problèmes liés aux essais

41. Afin d'éviter un surajustement, on peut envisager un échantillonnage aléatoire parmi les scénarios pertinents pour un système de conduite automatisé donné et son domaine de conception fonctionnelle. Cependant, bien qu'il soit préférable du point de vue de la crédibilité de multiplier les échantillonnages aléatoires, la charge qu'ils représentent pour les constructeurs et les autorités (notamment les services techniques) doit être prise en compte raisonnablement.

42. Le catalogue de scénarios n'est pas nécessairement exhaustif ; les autorités peuvent ainsi être amenées à envisager au besoin des scénarios supplémentaires pour étayer la validation de la sécurité d'un système de conduite automatisé. Une décision de ce type peut s'appuyer sur le domaine de conception fonctionnelle et le comportement du système à valider. Admettons par exemple qu'une fonctionnalité du système de conduite automatisé soit élaborée pour un domaine de conception fonctionnelle absent du catalogue de scénarios, ou avec une capacité absente dudit catalogue. Il est alors primordial d'envisager des scénarios supplémentaires afin que les scénarios choisis soient adaptés au domaine et à la capacité à tester.

VI. Simulations et essais virtuels

A. Termes courants

43. Les termes ci-après sont employés tout au long de la présente section :

a) On entend par *abstraction* le processus consistant à sélectionner les aspects essentiels d'un système source ou d'un système référent qui doivent être représentés dans un modèle ou une simulation, tout en ignorant les aspects non pertinents. Toute modélisation par abstraction repose sur l'hypothèse qu'elle ne doit pas affecter de manière sensible les utilisations prévues de l'outil de simulation ;

b) On entend par *test en boucle fermée* un environnement virtuel qui intègre les réactions de l'élément testé. Les objets simulés répondent aux actions du système (par exemple, le système interagit avec un modèle de trafic) ;

c) On entend par *système déterministe* un système dont l'évolution dans le temps peut être prédite de manière exacte et pour lequel un ensemble donné de stimuli produira toujours le même résultat ;

d) La *simulation avec conducteur dans la boucle (DIL)* fait généralement appel à un simulateur de conduite pour tester la conception de l'interaction homme-système automatisé. Le simulateur est équipé de composants permettant au conducteur de jouer un rôle actif et de communiquer avec l'environnement virtuel ;

e) La *simulation avec matériel dans la boucle (HIL)* fait appel à un modèle informatique exécuté sur un simulateur équipé d'entrées et de sorties pour tester le matériel d'un système donné du véhicule. La simulation HIL permet de reproduire l'instrumentation du système (capteurs, actionneurs et composants mécaniques) de manière à tester les interactions des modules de commande électronique bien avant que le système final ne soit intégré ;

f) On entend par *modèle* une description ou une représentation d'un système, d'une entité, d'un phénomène ou d'un processus ;

g) On entend par *étalonnage du modèle* le processus de réglage des paramètres numériques ou de modélisation du modèle pour améliorer sa concordance avec un référent ;

h) On entend par *paramètres du modèle* les valeurs numériques permettant de caractériser les fonctions d'un système. Il est impossible de mesurer directement les valeurs de ces paramètres, qui doivent être déduites des données réelles collectées au cours de la phase d'étalonnage du modèle ;

- i) La *simulation avec modèle dans la boucle (MIL)* est une approche qui permet de développer rapidement des algorithmes sans utiliser de matériel spécialisé. Ce niveau de développement implique en général la mise en place d'une structure logicielle à haut niveau d'abstraction, fonctionnant sur des systèmes informatiques polyvalents ;
- j) On entend par *test en boucle ouverte* un environnement virtuel qui n'intègre pas les réactions de l'élément testé (par exemple, le système interagit avec une situation de circulation enregistrée) ;
- k) On entend par *événement probabiliste* un événement non déterministe, dont les résultats sont décrits par une loi de probabilité ;
- l) On entend par *terrain d'essai ou piste d'essai* une installation d'essai physique, fermée à la circulation, où les performances d'un système de conduite automatisé peuvent être étudiées sur un véhicule réel. Il est possible d'introduire des éléments de circulation en stimulant les capteurs du véhicule ou en plaçant des dispositifs factices sur la voie ;
- m) La *stimulation par capteur* est une technique consistant à envoyer à l'élément testé des signaux générés artificiellement afin de l'amener à produire le résultat requis à des fins de validation en conditions réelles, de formation, de maintenance ou de recherche et développement ;
- n) La *simulation* consiste à reproduire dans le temps le fonctionnement d'un processus ou d'un système réels ;
- o) On entend par *modèle de simulation* un modèle dont les variables d'entrée varient dans le temps ;
- p) On entend par *chaîne de simulation* une combinaison d'outils de simulation utilisés pour étayer la validation d'un système de conduite automatisé ;
- q) La *simulation avec logiciel dans la boucle (SIL)* consiste à évaluer un modèle qui a été développé sur des systèmes informatiques polyvalents. Cette étape peut mettre en œuvre une version complète du logiciel très proche de sa version finale. Ce terme s'emploie pour désigner une méthode d'essai dans laquelle le code exécutable, par exemple des algorithmes, ou une stratégie de contrôleur complète, est testé dans un environnement de modélisation permettant de valider ou de tester le logiciel ;
- r) On entend par *processus stochastique* un processus qui comporte ou fait intervenir une ou plusieurs variables aléatoires, et qui relève du calcul des probabilités ;
- s) La *validation d'un modèle de simulation* consiste à déterminer la mesure dans laquelle un modèle constitue une représentation exacte du monde réel au regard des utilisations prévues de l'outil ;
- t) La *simulation avec véhicule dans la boucle (VIL)* consiste à tester le comportement d'un véhicule d'essai en associant des composants réels et un environnement virtuel. Elle permet de reproduire la dynamique du véhicule de manière réaliste et peut être mise en œuvre sur un banc d'essai ou sur une piste d'essai ;
- u) La *vérification du modèle de simulation* consiste à déterminer le niveau de conformité d'un modèle ou d'un outil d'essai virtuel aux prescriptions et spécifications détaillées dans les modèles théoriques, les modèles mathématiques ou d'autres conceptions ;
- v) On entend par *essai virtuel* le processus consistant à tester un système à l'aide d'un ou plusieurs modèles de simulation.

B. Introduction

- a) La simulation fournit des outils puissants pour évaluer les performances d'un système de conduite automatisé dans des conditions diverses et complexes que les essais physiques classiques ne peuvent reproduire. Les essais virtuels, qui s'appuient sur des modèles de simulation, jouent un rôle essentiel dans l'évaluation complète d'un système de conduite automatisé. La contribution majeure qu'ils apporteront à l'élaboration et à la validation des

systèmes de conduite automatisés justifie leur prise en compte en tant que composante de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée.

b) Bien que des méthodes robustes pour les essais virtuels soient disponibles et largement utilisées, l'objectif de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée est de confirmer qu'il est possible d'établir de manière fiable les performances de sécurité d'un système de conduite automatisé dans le monde physique. Par conséquent, la présente section du document de référence présente les outils et les méthodes pour les essais virtuels et analyse la complémentarité de cette composante avec les autres méthodes d'essai.

C. Utilisation des essais virtuels et de la simulation dans le cadre de l'élaboration et de la validation des systèmes de conduite automatisés

44. Les essais virtuels peuvent être utilisés au cours de différentes phases de l'élaboration et de la validation des systèmes de conduite automatisés. Ils permettent d'étudier de manière complète et peu onéreuse tout ou partie d'un système de conduite automatisé dans un large éventail de scénarios de circulation couvrant différents domaines de conception fonctionnelle et à des fins diverses. Les essais virtuels, qui reposent sur la simulation, sont particulièrement indiqués pour tester les systèmes de conduite automatisés dans des situations critiques pour la sécurité (ou scénarios critiques) qu'il serait difficile, voire dangereux, de reproduire sur une piste d'essai ou sur la voie publique.

45. Un essai virtuel consiste à remplacer par une simulation un ou plusieurs éléments physiques définis dans un scénario. L'objectif de cette simulation est de reproduire, dans une mesure suffisante, les éléments physiques d'origine. Dans le cas des applications automobiles, les essais virtuels peuvent servir à reconstituer l'environnement de conduite et les objets actifs au sein de celui-ci qui interagissent avec la totalité du système (par exemple, un véhicule complet avec ses pneus et ses fonctions de conduite automatisée), un sous-système (par exemple, un actionneur ou un module de commande) ou un composant (par exemple, un capteur).

46. Cette approche permet à l'évaluateur de vérifier la fiabilité du système de conduite automatisé en s'appuyant sur les essais virtuels et la validation effectués par le développeur de manière flexible, contrôlable, prévisible, reproductible et efficace.

47. La chaîne de simulation utilisée pour les essais virtuels permet d'associer différentes méthodes. Ainsi, les tests peuvent être effectués :

a) Entièrement sur un ordinateur (simulation MIL ou SIL), en faisant interagir le modèle des éléments concernés (par exemple, une représentation simple de la logique de commande d'un système de conduite automatisé) avec un environnement virtuel ;

b) En faisant interagir un capteur, un sous-système ou le véhicule entier avec un environnement virtuel (simulation HIL ou VIL). Les simulations VIL peuvent se dérouler :

i) En laboratoire, le véhicule étant à l'arrêt ou en mouvement sur un banc à rouleaux ou un banc d'essai du groupe motopropulseur et connecté au modèle d'environnement par un câble ou par stimulation directe de ses capteurs ;

ii) Sur un terrain d'essai, le véhicule étant connecté à un modèle d'environnement et interagissant avec des objets virtuels tout en se déplaçant physiquement sur la piste d'essai ;

c) En faisant interagir un sous-système avec un conducteur réel (simulation DIL).

48. L'interaction entre le système testé et l'environnement peut se faire en boucle ouverte ou bien fermée.

a) Les essais virtuels en boucle ouverte (également appelés retraitement logiciel ou matériel, mode fantôme, etc.) peuvent faire intervenir diverses méthodes, comme l'interaction du système de conduite automatisé avec des situations virtuelles tirées du monde réel. Dans ce cas, les actions des objets virtuels sont uniquement pilotées par les données, et les informations ne sont pas rectifiées automatiquement en fonction de la rétroaction. Les signaux de sortie du contrôleur à boucle ouverte pouvant fluctuer à l'insu du système de

conduite automatisé ou de l'évaluateur en raison de perturbations externes, l'applicabilité des essais en boucle ouverte à la validation du système risque d'être limitée.

b) Dans les essais virtuels en boucle fermée, une boucle de rétroaction transmet en permanence au système de conduite automatisé des informations provenant du contrôleur en boucle fermée. Le comportement des objets numériques peut varier en fonction de l'action du système testé.

49. Le choix du type d'essai, en boucle ouverte ou fermée, dépend de facteurs tels que les objectifs des essais virtuels et l'état d'avancement de l'élaboration du système testé. Dans le cadre de la validation des systèmes de conduite automatisés, il est prévu de mettre en œuvre principalement des essais virtuels en boucle fermée. On trouvera des exemples d'outils pour les essais virtuels dans l'appendice 1 de l'annexe III du présent document.

D. Avantages et inconvénients de la composante

50. Du fait de sa souplesse, cette composante constitue une méthode d'essai standard pour la conception et la validation des véhicules en général. S'agissant des systèmes de conduite automatisés, il est indispensable de recourir aux essais virtuels pour vérifier la capacité du système automatisé à gérer correctement une grande variété de scénarios de circulation ; il est en effet impossible de tester le comportement du véhicule en conditions réelles dans toutes les situations envisageables et à chaque modification de sa logique de conduite. Les essais virtuels peuvent aussi être extrêmement utiles pour remplacer les essais en conditions réelles et sur terrain d'essai s'agissant des scénarios critiques.

51. De plus, les essais virtuels destinés à valider les systèmes de conduite automatisés peuvent répondre à différents objectifs, en fonction de la stratégie globale de validation et de l'exactitude des modèles de simulation sous-jacents :

a) Fournir une mesure qualitative de la fiabilité de l'ensemble du système en matière de sécurité ;

b) Contribuer directement à établir le degré de fiabilité statistique de l'ensemble du système en matière de sécurité (avec quelques réserves) ;

c) Fournir une mesure qualitative ou statistique de la fiabilité et des performances de sous-systèmes ou de composants spécifiques ;

d) Mettre en évidence des scénarios éprouvants à tester dans le monde réel (par exemple, les essais en conditions réelles et les essais sur piste décrits aux sections VII et VIII du présent document).

52. En dépit de tous ses avantages potentiels, cette approche est limitée par sa faible fidélité intrinsèque. Les modèles ne pouvant fournir qu'une représentation grossière de la réalité, il convient d'évaluer soigneusement la capacité d'un modèle à simuler de manière satisfaisante les situations réelles aux fins de la validation du niveau de sécurité des systèmes de conduite automatisés. Il est par conséquent essentiel de valider les modèles de simulation utilisés dans les essais virtuels afin de déterminer la fiabilité des résultats et leur transposition dans le monde réel.

53. Une méthode permettant d'évaluer l'exactitude d'une chaîne de simulation consiste à comparer les performances du système de conduite automatisé dans un essai virtuel avec les résultats obtenus en conditions réelles pour le même scénario. Les essais virtuels permettant de simuler un nombre de scénarios bien plus élevé que les essais sur piste, la validation devra probablement porter sur un ensemble plus restreint, bien que suffisamment représentatif, de scénarios pertinents, afin de justifier les extrapolations au-delà des scénarios utilisés pour la validation.

54. Le tableau 1 résume les principaux avantages et inconvénients des essais virtuels dans le cadre de la démonstration du niveau de sécurité par le constructeur.

Tableau 1
Avantages et inconvénients de la composante Essais virtuels

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Contrôlabilité – Les essais virtuels offrent une possibilité inégalée de contrôler de nombreux paramètres d’un test. • Flexibilité – Les essais virtuels permettent d’évaluer immédiatement les modifications apportées au système. • Efficacité – Dans le cas des simulations MIL et SIL, les essais virtuels peuvent être accélérés par rapport au temps réel, de sorte qu’il est possible de mener simultanément de nombreux essais dans un laps de temps relativement court. • Faible coût de l’exécution des essais – Si les investissements nécessaires à l’élaboration, à la validation et à la maintenance d’une chaîne de simulation sont importants, les coûts de fonctionnement sont très inférieurs à ceux des essais physiques. • Exhaustivité des scénarios – Les essais virtuels permettent d’étudier les scénarios critiques de manière plus exhaustive que les autres méthodes d’essai. Une combinaison adéquate de paramètres expérimentaux permet par exemple de réduire l’espace des inconnues connues et, dans la mesure du possible, celui des inconnues inconnues (y compris l’effet des défaillances du système). • Collecte et analyse des données – Les essais virtuels constituent un moyen pratique et fiable de recueillir des données sur les performances des systèmes de conduite automatisés et de les analyser. Une fois qualifiées, ces données peuvent être très utiles pour évaluer les risques liés aux systèmes. • Répétabilité et reproductibilité – La simulation permet de répéter plusieurs fois le même essai sans déviations dues à des phénomènes aléatoires. Les défauts de fonctionnement du système de conduite automatisé peuvent ainsi être reproduits à l’identique à tout moment. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fidélité et fiabilité limitées – Il est difficile, voire impossible, pour les modèles de reproduire complètement l’environnement réel, les réactions, ainsi que le comportement du véhicule, des autres usagers de la route, etc. Le processus de validation ne permet pas non plus de démontrer la validité de la simulation pour tous les scénarios possibles. • Risque d’excès de confiance. Si l’on ne tient pas compte des limites intrinsèques des modèles, on risque d’accorder trop d’importance aux résultats des essais virtuels, sans apporter de preuves suffisantes de leur validité par des essais physiques. • Coût élevé du cycle de vie du logiciel. Pour disposer d’un modèle de simulation permettant de mener des essais virtuels, il est nécessaire de prévoir certaines phases du cycle de vie du logiciel qui peuvent s’avérer longues et onéreuses.

E. Maturité de la composante

55. Les méthodes appliquées pour les essais virtuels sont en constante évolution. Si elles sont à bien des égards matures et couramment utilisées dans le cadre de l’élaboration et de la conception, la fiabilité et la validité en conditions réelles de chaque outil doivent encore être déterminées. Bien que les essais virtuels puissent être mis en œuvre à la fois pendant l’élaboration et la validation du système de conduite automatisé par le constructeur du véhicule, et dans le cadre de la certification du système par les autorités, ils ne peuvent être considérés comme une solution éprouvée qu’au titre d’outils utilisés par le constructeur. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour définir les prescriptions relatives à l’utilisation des essais virtuels au cours de la certification. Les sujets à aborder sont par exemple les exigences en matière de validation. Il convient en effet de prouver que la chaîne

de simulation utilisée pour les essais virtuels reproduit fidèlement le système réel aux fins de l'expérimentation. C'est pourquoi l'annexe III et les appendices correspondants du présent document décrivent le cadre d'évaluation de la crédibilité mis au point pour démontrer la fiabilité d'une chaîne d'outils d'essai virtuel destinée à valider les prescriptions de sécurité des systèmes de conduite automatisés.

56. Les recherches concernant la future application des essais virtuels à la certification des systèmes de conduite automatisés portent également sur la possibilité pour les autorités d'héberger et de gérer un environnement de simulation validé et normalisé auquel le constructeur pourrait connecter le système à valider (soit sous la forme d'un système physique, soit sous celle d'un modèle ou d'un logiciel) pour démontrer sa conformité aux prescriptions de sécurité définies par la réglementation.

57. Cette question faisant actuellement l'objet de travaux de recherche et de normalisation, les essais virtuels ne peuvent à court terme être menés que sur des chaînes de simulation élaborées et gérées par les constructeurs de véhicules ou les concepteurs de systèmes de conduite automatisés. Leur conception dépendant des stratégies de validation et de vérification mises en œuvre par le constructeur, ils ne devraient pas être soumis à une réglementation ou à une normalisation, mais plutôt être expliqués et documentés par les constructeurs de systèmes de conduite automatisés ou de véhicules, et les éléments sur lesquels reposent leur vérification et leur validation devraient être examinés au cours de la certification. C'est pour cette raison qu'il est prévu d'harmoniser la documentation et les données fournies par les constructeurs.

F. Interactions entre les essais virtuels et les autres méthodes d'essai

58. Les liens entre les essais virtuels et toutes les autres composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée seront étroits pour les raisons suivantes en particulier :

a) Les essais virtuels élargissent la portée des essais physiques en tenant compte de la diversité des conditions de circulation. Leurs atouts résident dans leur capacité à évaluer les performances de manière économique, en fonction de toute une série de variables et sur tout un éventail de scénarios. Grâce à ces essais, il est possible de compléter les résultats des essais physiques, qui sont limités, par des données vérifiables, représentatives des déclinaisons du scénario d'essai physique. Les essais virtuels permettent aussi de couvrir les niveaux d'abstraction logique des scénarios critiques, et de vérifier qu'un système de conduite automatisé fonctionnera comme prévu sur l'ensemble des plages de paramètres. Ces avantages atténuent les contraintes liées aux tests physiques (en compensant leurs inconvénients) et améliorent l'efficacité globale de l'évaluation, menée en recourant à l'ensemble des composantes. On peut également faire appel aux essais virtuels pour repérer et étudier les cas limites, et d'autres scénarios peu probables, afin de renforcer la confiance dans les performances.

b) Les essais virtuels peuvent jouer un rôle important dans l'élaboration des prescriptions relatives aux performances et des scénarios de circulation. Ils permettent également d'évaluer les limites de performance d'un système de conduite automatisé, ce qui contribue à mieux définir la frontière entre prévention des collisions et atténuation de leurs effets. Grâce à la randomisation et aux compositions, les essais virtuels permettent en outre au développeur ou à l'évaluateur de soumettre le système de conduite automatisé à des scénarios imprévus et aléatoires, ce qui augmente la confiance dans les performances du système lorsqu'il est confronté à des événements peu probables.

c) Les essais virtuels seront un élément clef de l'audit et de l'évaluation. Les résultats des essais virtuels effectués tant pendant la mise au point du véhicule que dans la phase de vérification et de validation constituent des éléments importants qui seront soumis à l'audit. Les constructeurs devront fournir des informations et de la documentation sur la manière dont ils sont menés et dont la chaîne de simulation sous-jacente a été validée.

d) Les essais en conditions réelles peuvent contribuer à générer des modèles de simulation réalistes et à établir leur exactitude :

i) Utilisation de données réelles pour valider les modèles de simulation des véhicules et des composants : les données du véhicule et les données mesurées par les capteurs du véhicule sont des sources d'information précieuses pour quantifier et étayer l'exactitude des modèles (par exemple, modélisation de la dynamique du véhicule ou des capteurs) ;

ii) Utilisation de données réelles pour modéliser la circulation : la génération de nouveaux scénarios nécessite de simuler de manière réaliste le comportement des usagers de la route pour que l'environnement de simulation reste pertinent et représentatif.

e) Les essais virtuels peuvent être très utiles pour résoudre les problèmes mis en évidence grâce à la surveillance en fonctionnement des performances des systèmes de conduite automatisés. Ils permettent en effet d'analyser rapidement et avec souplesse les événements réels afin de vérifier la capacité des systèmes de conduite automatisés à les gérer correctement et, si nécessaire, d'apporter des modifications pour améliorer les performances de ces systèmes. Les descriptions de scénarios peuvent être partagées et intégrées rapidement aux systèmes d'essais virtuels du monde entier. Grâce à leur diversité, les essais virtuels, y compris les simulations HIL, très proches des essais physiques, apportent rapidement des réponses fiables.

G. Utilisation de la composante pour évaluer les prescriptions de sécurité des systèmes de conduite automatisés

59. La mise en œuvre d'essais virtuels faisant appel à une chaîne de simulation validée permet d'évaluer la conformité des systèmes de conduite automatisés aux prescriptions de sécurité. Au vu des catégories de prescriptions de sécurité actuellement envisagées, ces essais semblent particulièrement pertinents dans les cas suivants :

a) Les systèmes de conduite automatisés doivent conduire en toute sécurité et gérer correctement les situations critiques. Les essais virtuels peuvent jouer un rôle prépondérant à cet égard. Il est en effet possible de recourir à des simulations MIL/SIL, HIL ou VIL pour évaluer la conformité aux prescriptions à différents stades de la vérification et de la validation du véhicule ;

b) Les systèmes de conduite automatisés doivent interagir en toute sécurité avec le conducteur. Les simulations DIL peuvent contribuer à évaluer la conformité à cette prescription en analysant l'interaction entre le conducteur et le système de conduite automatisé dans un environnement sûr et contrôlé ;

c) Les systèmes de conduite automatisés doivent gérer en toute sécurité les modes de défaillance et garantir un état de fonctionnement sûr. Le recours aux essais virtuels pour évaluer la conformité à ces prescriptions est également très prometteur, mais nécessite probablement des recherches supplémentaires. Les simulations SIL pourraient inclure des pannes et des demandes de maintenance. Les simulations HIL et VIL pourraient quant à elles être utilisées pour évaluer la manière dont le système réagit à un dysfonctionnement réel.

VII. Essais sur piste

A. Objectif

60. Les essais sur piste se déroulent sur un terrain d'essai fermé à la circulation et font appel à des obstacles réels et à des substituts (des cibles de collision, par exemple) pour évaluer la conformité des systèmes de conduite automatisés aux prescriptions de sécurité (liées aux facteurs humains ou au système de sécurité, par exemple). Cette approche permet de tester les véhicules physiques sur un ensemble limité de scénarios réalistes (tenant compte de la géométrie, des dimensions et de la taille de la piste d'essai, ainsi que du domaine de

conception fonctionnelle) afin d'évaluer les sous-systèmes ou le système complet. Les entrées et conditions externes peuvent être contrôlées ou mesurées pendant le test.

61. Cette méthode d'essai reproduit l'environnement du véhicule plus fidèlement qu'une simulation. En outre, elle permet de tester le véhicule dans des conditions plus sûres que celles des essais en situation réelle. Cependant, le recours aux pistes d'essai pouvant nécessiter des ressources conséquentes, il convient de sélectionner des scénarios critiques connus. Pour de plus amples informations sur les avantages et les inconvénients de cette méthode, on se reportera au tableau 2 ci-dessous.

62. Les essais sur piste conviennent peut-être mieux que les autres pour évaluer les capacités des systèmes de conduite automatisés dans un nombre limité de scénarios nominaux et de scénarios critiques. Il est possible d'utiliser les mêmes tests pour évaluer les performances des véhicules liées aux facteurs humains ou aux stratégies de secours.

Tableau 2

Avantages et inconvénients de la composante Essais sur piste

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Contrôlabilité – Les essais sur piste permettent de contrôler de nombreux paramètres de test, y compris certains paramètres du domaine de conception fonctionnelle. • Fidélité – Les essais sur piste mettent en œuvre des véhicules physiques fonctionnels équipés d'un système de conduite automatisé, ainsi que des obstacles et des conditions environnementales réalistes. • Reproductibilité – Les scénarios d'essai sur piste peuvent être reproduits dans différents endroits par différentes entités. • Répétabilité – Les essais sur piste permettent de répéter de nombreuses fois les tests, de la même manière et avec les mêmes entrées et conditions initiales. • Efficacité – Les essais sur piste permettent d'exposer les véhicules à des situations critiques ou des événements rares connus plus rapidement que les essais en conditions réelles, en mettant en œuvre des scénarios d'essai spécialement conçus à cet effet. Il semblerait en revanche que les essais sur route soient peu efficaces pour tester les phénomènes aléatoires. • Les essais sur piste peuvent être utilisés pour valider la qualité de la chaîne de simulation en comparant les performances d'un système de conduite automatisé dans le cadre d'une simulation avec ses performances sur une piste d'essai dans le même scénario. 	<ul style="list-style-type: none"> • Chronophage – La mise en place et l'exécution des essais sur piste peuvent prendre beaucoup de temps. • Coût élevé – Les essais sur piste peuvent nécessiter un nombre important de personnes et un équipement d'essai spécialisé (obstacles, dispositifs de mesure et conducteur d'appoint, par exemple). • Variabilité limitée – Il peut être difficile de modifier les infrastructures et les conditions des essais sur piste pour tenir compte d'une grande variété d'éléments de test (par exemple, les conditions des domaines de conception fonctionnelle). Les contraintes sont notamment les suivantes : géométrie, dimensions, taille, limites des domaines de conception fonctionnelle telles que les conditions météorologiques, l'heure de la journée, et le nombre et le type des autres éléments de circulation. • Risques – Les essais sur piste réalisés avec des véhicules physiques et des obstacles réels se déroulent dans un environnement potentiellement incertain et dangereux pour les participants (le conducteur d'appoint et les observateurs, par exemple). • Faible représentativité malgré une meilleure fidélité – S'il est possible d'inclure des éléments tels que des piétons, il ne s'agit généralement pas de personnes réelles pour des raisons de sécurité, et il est impossible de reproduire l'encombrement de l'environnement réel.

B. Pourquoi inclure cette composante dans la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée ?

63. Comme indiqué au paragraphe 62 ainsi que dans le tableau des avantages et des inconvénients, les raisons d'inclure les essais sur piste dans la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée sont nombreuses. Ainsi, les essais sur piste peuvent être

utilisés pour évaluer les performances des systèmes de conduite automatisés dans des scénarios nominaux et critiques. De surcroît, ils reproduisent l'environnement du véhicule plus fidèlement qu'une simulation et permettent d'exposer les véhicules à des situations critiques ou des événements rares connus plus rapidement que les essais en conditions réelles.

C. Maturité de la composante

64. Bien que les essais sur piste constituent une méthode éprouvée, employée pour évaluer la conformité de certaines technologies actuelles aux prescriptions de sécurité, les essais portant sur les véhicules équipés de systèmes de conduite automatisés sont relativement nouveaux et doivent encore être affinés. Par exemple, il peut être difficile de mettre au point des éléments spécifiques liés aux domaines de conception fonctionnelle, tels que la pluie, le brouillard et la neige, pour tester de manière fiable la façon dont un système de conduite automatisé interagit avec ces éléments environnementaux. On trouvera dans l'annexe VII une vue d'ensemble de l'approche envisagée pour la mise au point des composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée relatives aux essais physiques, y compris les essais sur piste.

D. Comment cette composante interagit-elle avec les autres ?

65. Les informations produites pendant les essais sur piste peuvent également être utilisées pour valider les essais virtuels, en comparant les performances du système de conduite automatisé dans un essai virtuel avec ses performances sur une piste d'essai selon le même scénario. Ainsi, on peut avoir recours à un essai sur piste pour valider la qualité et la fiabilité de la chaîne de simulation, en comparant les performances du système de conduite automatisé dans un essai virtuel avec ses performances sur une piste d'essai selon le même scénario.

VIII. Essais en conditions réelles

A. Objectif

66. Les essais en conditions réelles se déroulent sur la voie publique et visent à évaluer les capacités et la conformité aux prescriptions de sécurité (liées aux facteurs humains ou au système de sécurité, par exemple) d'un véhicule équipé d'un système de conduite automatisé.

67. Cette méthode d'essai permet d'exposer le système de conduite automatisé à une grande variété de situations réelles liées à un domaine de conception fonctionnelle. Il existe différentes approches dans ce contexte : les essais en conditions réelles peuvent par exemple être effectués dans un domaine de conception fonctionnelle spécifique (par exemple, la conduite sur autoroute), avec un conducteur d'appoint qui surveille le système de conduite automatisé et s'assure que celui-ci fonctionne en toute sécurité.

68. Les essais en conditions réelles peuvent servir à évaluer certains aspects des performances du système de conduite automatisé dans des conditions de circulation réelles, par exemple la conduite en douceur, la capacité à faire face à une circulation dense, l'interaction avec les autres usagers de la route, l'intégration dans le flux de circulation, et le respect et la courtoisie envers les autres véhicules.

69. Les essais en conditions réelles peuvent également être utilisés pour évaluer les performances du système de conduite automatisé dans certaines limites du domaine de conception fonctionnelle (scénarios nominaux et complexes), notamment afin de vérifier si le système déclenche bien les demandes de transition au conducteur au moment où il est censé le faire (fin du domaine de conception fonctionnelle ou conditions météorologiques, par exemple). Les mêmes tests peuvent être réalisés pour vérifier les performances liées aux facteurs humains dans ces conditions.

70. Enfin, les essais en conditions réelles peuvent aider à détecter des problèmes qui ne sont pas forcément bien appréhendés par les essais sur piste et la simulation, comme la limitation de la qualité de perception (par exemple en raison des conditions de luminosité, de la pluie, etc.).

71. Bien que les essais en conditions réelles ne permettent pas d'aborder tous les scénarios de circulation, il est possible d'augmenter la probabilité d'occurrence de certains scénarios complexes en sélectionnant un type de domaine de conception fonctionnelle (par exemple, une autoroute) et en étudiant le lieu et le moment où des événements spécifiques (par exemple, une circulation fluide ou dense) se produisent généralement.

72. Les infractions recensées au cours des essais en conditions réelles peuvent être examinées et analysées ultérieurement en étudiant les informations et les données recueillies à l'aide d'essais virtuels, sur piste et sur route. Il est par ailleurs possible de collecter des données d'essai en conditions réelles afin de proposer et d'enregistrer de nouveaux scénarios de circulation, et d'améliorer à l'avenir la fidélité avec laquelle les méthodes d'essai virtuel et sur piste reproduisent les conditions environnementales.

73. Pour de plus amples informations sur les avantages et les inconvénients de cette méthode d'essai, on se reportera au tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3

Avantages et inconvénients de la composante Essais en conditions réelles

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Reproduction très fidèle de l'environnement – Les essais en conditions réelles permettent d'évaluer les performances du véhicule dans les domaines de conception fonctionnelle prévus et dans les diverses conditions que ceux-ci peuvent présenter. • Les essais en conditions réelles peuvent être utilisés pour tester des éléments de scénario, tels que les conditions météorologiques et les infrastructures (les ponts et les tunnels, par exemple), qui ne sont pas disponibles dans le cadre des essais sur piste. • Les essais en conditions réelles peuvent être utilisés pour valider les essais virtuels et les essais sur piste en comparant les performances du système de conduite automatisé dans le cadre de ces essais avec ses performances en conditions réelles dans le même scénario. • Les essais en conditions réelles peuvent être utilisés pour évaluer les performances du système de conduite automatisé s'agissant de son interaction avec les autres usagers de la route (par exemple, l'intégration dans le flux de circulation ou le respect et la courtoisie envers les autres véhicules). • Validation du modèle, d'un seul logiciel et de la chaîne de simulation 	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôlabilité limitée – Les scénarios sur route ne permettent qu'un contrôle limité des conditions des domaines de conception fonctionnelle. • Reproductibilité limitée – Il est difficile de reproduire exactement les scénarios sur route dans des lieux différents. • Répétabilité limitée – Il est difficile de reproduire de nombreuses fois les scénarios sur route de la même manière. • Évolutivité limitée – Il se peut qu'un scénario sur route ne soit pas suffisamment évolutif. • Coût élevé, mais inférieur à celui des essais sur piste – Les essais en conditions réelles nécessitent des ressources importantes et sont chronophages. • Incidences potentielles sur les autorités chargées de la circulation et de la sécurité • Il se peut que les autorités soient amenées à développer de nouvelles compétences. • Risques – Les essais en conditions réelles sont susceptibles d'exposer le personnel chargé des essais et le public à des comportements dangereux.

B. Pourquoi inclure cette composante dans la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée ?

74. Les essais en conditions réelles permettent de valider le niveau de sécurité du système de conduite automatisé dans son véritable environnement d'exploitation, comme indiqué plus en détail aux paragraphes 68, 69 et 70.

C. Maturité de la composante

75. Des essais en conditions réelles sont régulièrement effectués pour évaluer les performances des conducteurs humains. L'évaluation des performances des systèmes de conduite automatisés peut toutefois constituer un nouveau défi pour cette méthode d'essai. Il est toutefois possible de s'inspirer d'autres protocoles de test applicables aux véhicules à moteur, tels que les essais d'émissions en conditions réelles de circulation et la surveillance des marchés. On trouvera dans l'annexe VII une vue d'ensemble de l'approche envisagée pour la mise au point des composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée relatives aux essais physiques, y compris les essais en conditions réelles.

D. Comment cette composante interagit-elle avec les autres ?

76. Les essais en conditions réelles peuvent être utilisés pour valider la modélisation des éléments d'un environnement d'essais virtuels ou sur piste en comparant les performances du système de conduite automatisé dans le cadre de ces essais avec ses performances en conditions réelles dans le même scénario.

77. Cette composante peut également être utilisée pour proposer de nouveaux scénarios de circulation pour les essais virtuels et sur piste, ce qui permet de repérer des cas limites et d'autres vulnérabilités inconnues qui pourraient mettre le système de conduite automatisé en difficulté. Les informations recueillies au cours des essais en conditions réelles peuvent également être utilisées aux fins de l'analyse des risques propres aux systèmes de conduite automatisés et de la conception de ces systèmes.

IX. Audit

A. Objectif

78. La composante Audit s'emploie dans le but de procéder à un examen visant à démontrer que :

- a) Le constructeur a mis en place des procédures adéquates pour assurer la sécurité opérationnelle et fonctionnelle tout au long du cycle de vie du véhicule ;
- b) La sécurité a été intégrée dès la phase de conception du véhicule et celle-ci a été suffisamment validée avant la mise sur le marché. La validation doit être corroborée par la surveillance en fonctionnement.

79. Le constructeur doit démontrer que :

- a) Des procédures robustes ont été adoptées pour garantir la sécurité sur la totalité du cycle de vie du véhicule (phase de développement, production, mais aussi exploitation sur route et mise hors service). Cela suppose notamment de mettre en place les moyens adéquats pour superviser le véhicule sur le terrain et de prendre les mesures qui s'imposent en cas de besoin ;
- b) Les dangers et les risques propres au système ont été recensés et un processus cohérent de sécurité par conception a été établi afin d'en atténuer les effets ;
- c) L'évaluation des risques et le processus de sécurité par conception ont été validés par le constructeur au moyen d'essais montrant, avant la mise sur le marché du

véhicule, que celui-ci satisfait aux prescriptions de sécurité et qu'il ne présente pas de risques déraisonnables pour l'ensemble de l'écosystème des transports, et en particulier pour le conducteur, les passagers et les autres usagers de la route.

B. Pourquoi inclure cette composante dans la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée ?

80. À la lumière des éléments fournis par le constructeur et des résultats des essais ciblés, les autorités pourront examiner les processus, l'évaluation des risques, la conception et la validation du constructeur et vérifier si ceux-ci permettent d'assurer de manière adéquate la sécurité opérationnelle et fonctionnelle.

81. En tant que tels, ces éléments – évaluation des risques, principe de sécurité par conception et essais de validation – peuvent être utilisés pour démontrer le niveau de sécurité global d'un système de conduite automatisé d'une manière bien plus rigoureuse qu'un nombre limité d'essais physiques ou virtuels.

C. Avantages et inconvénients de la composante

82. L'analyse des risques, la sécurité par conception ainsi que les méthodes d'essai pour la vérification et la validation sont des méthodes de développement standard qui s'appliquent depuis des années dans l'industrie automobile afin d'assurer la sécurité fonctionnelle des systèmes électroniques (sécurité intégrée). On s'attend à ce que des méthodes similaires soient employées par les constructeurs pour réduire autant que possible et de manière systématique les risques que les scénarios dangereux et inconnus présentent pour les systèmes de conduite automatisés (sécurité opérationnelle au-delà des défaillances).

83. Les outils de la composante Audit permettront de vérifier le niveau de sécurité du système de conduite automatisé de manière plus probante que quelques essais. Le dossier de sécurité du constructeur sera renforcé s'il est examiné par un auditeur indépendant et validé par des essais physiques ou virtuels ciblés. Des tests seront notamment nécessaires pour démontrer que le véhicule présente des performances minimales pour les manœuvres standard (par exemple, le maintien de la trajectoire normale ou le changement de voie), les scénarios critiques clefs (le freinage d'urgence, par exemple) et les conditions de circulation données (par exemple, l'intégration harmonieuse dans le trafic). Il reste à décider à ce stade si ces essais doivent être normalisés pour l'ensemble des constructeurs pour certaines situations, ou bien s'ils doivent être adaptés en fonction des résultats de l'évaluation des risques et de la conception du système de conduite automatisé, ou les deux.

D. Maturité de la composante

84. La composante Audit est déjà présente depuis longtemps dans les Règlements ONU (par exemple, le Règlement ONU n° 79 concernant l'équipement de direction, le Règlement ONU n° 13 concernant le freinage et le Règlement ONU n° 152 concernant les systèmes actifs de freinage d'urgence). Le groupe VMAD a également proposé une composante Audit actualisée pour le règlement sur les systèmes automatisés de maintien dans la voie, en conformité avec les concepts décrits ci-dessus. Le nouveau Règlement ONU n° 155 sur la cybersécurité et le système de gestion de la cybersécurité fait également appel aux audits.

85. L'analyse des risques, l'audit et la validation ainsi que la gestion de la sécurité sont des pratiques bien établies dans l'industrie automobile (ISO 26262 : Véhicules routiers – Sécurité fonctionnelle). Des travaux portant sur les nouveaux risques pour la sécurité opérationnelle posés par les systèmes actifs d'aide à la conduite et les systèmes de conduite automatisés sont en cours, par exemple les normes ISO/PAS 21448, BSI PAS 1880:2020, BSI PAS 1881:2020 (<https://www.bsigroup.com/en-GB/CAV/pas-1881/>) et UL 4600. Un travail de normalisation similaire existe pour la cybersécurité (ISO/SAE 21434).

86. Il convient de noter que la publication volontaire de rapports d'évaluation du niveau de sécurité établis par les constructeurs est également encouragée par certaines Parties contractantes (par exemple, les États-Unis d'Amérique et le Canada).

87. Les questions pertinentes à examiner en ce qui concerne l'évaluation de la sécurité par conception sont abordées dans l'annexe IV. Les prescriptions relatives à l'audit du système de gestion de la sécurité du constructeur font l'objet de l'annexe V.

X. Surveillance en fonctionnement et notification

A. Objectif

88. La composante Surveillance en fonctionnement et notification porte sur la sécurité de fonctionnement des véhicules automatisés après leur mise sur le marché. Dans la pratique, la mise en œuvre des autres composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée permet de déterminer si le système de conduite automatisé est raisonnablement sûr et peut être mis sur le marché, tandis que la surveillance en fonctionnement et la notification permettent de recueillir des données sur le terrain pour vérifier que le système reste sûr lorsqu'il est utilisé sur route. La composante étudie la nature dynamique du transport routier afin que la sécurité routière bénéficie de l'attention requise et soit constamment améliorée grâce à l'utilisation des systèmes de conduite automatisés.

89. La composante repose sur la collecte de données pertinentes dans le cadre de l'exploitation des véhicules automatisés/autonomes.

90. L'analyse a posteriori des données provenant des constructeurs et d'autres sources pertinentes permet d'atteindre les trois objectifs principaux de la composante, à savoir :

a) Démontrer que l'évaluation initiale du niveau de sécurité (risques résiduels) menée pendant la phase d'audit avant la mise sur le marché se vérifie sur le terrain au fil du temps (validation du niveau de sécurité) ;

b) Alimenter la base de données commune avec de nouveaux scénarios majeurs susceptibles de se produire avec des véhicules automatisés (génération de scénarios) ;

c) Formuler des recommandations en matière de sécurité à l'intention de l'ensemble des spécialistes du secteur, en partageant les enseignements tirés des principaux accidents et incidents, afin de leur permettre d'exploiter les informations issues de l'expérience sur le terrain, ce qui favorise l'amélioration continue de la technologie et de la réglementation (recommandations en matière de sécurité).

91. L'obligation pour le constructeur de mettre en place un dispositif de surveillance en temps réel (autocontrôles ou systèmes d'autodiagnostic) des performances des sous-systèmes de conduite automatisés ne fait pas partie de la présente composante, mais des prescriptions de sécurité. Certains mécanismes de communication d'informations sur l'évolution dans le temps des performances des sous-systèmes de conduite automatisés pourraient toutefois faire partie du premier alinéa ci-dessus, et contribuer ainsi à la surveillance préventive de la dégradation des performances en matière de sécurité.

92. Les processus mis en place par le constructeur pour gérer la sécurité de fonctionnement (par exemple pour gérer les évolutions du code de la route et des infrastructures) ne relèvent pas de la présente composante, mais de la composante Audit. La présente composante met l'accent sur le type de données qu'il convient de suivre et de communiquer

B. Pourquoi inclure cette composante dans la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée ?

93. Quelles que soient les conclusions de l'évaluation du niveau de sécurité menée avant la mise sur le marché, le niveau de sécurité réel ne sera établi que lorsqu'un nombre suffisant de véhicules aura été mis en circulation et qu'ils auront été soumis à un éventail représentatif de

situations de circulation et de conditions environnementales. Il est donc essentiel de mettre en place une boucle de rétroaction (surveillance du parc automobile) pour vérifier la pertinence du processus de sécurité par conception et corroborer la validation effectuée par le constructeur avant la commercialisation. Le retour d'expérience résultant de la surveillance en fonctionnement permettra d'évaluer a posteriori les exigences réglementaires et les méthodes de validation, et fournira des indications sur les lacunes à combler et les modifications à apporter.

94. Il se peut que les véhicules automatisés/autonomes déjà commercialisés fassent apparaître de nouveaux scénarios et de nouveaux risques. La composante Surveillance en fonctionnement pourrait donc être utilisée pour alimenter la base de données commune des scénarios afin de prendre en compte ces nouveaux risques.

95. Enfin, au cours de la phase initiale de mise sur le marché des systèmes de conduite automatisés, il est essentiel que les spécialistes du secteur tirent les enseignements des accidents impliquant des véhicules automatisés/autonomes et se mobilisent rapidement pour faire évoluer la sécurité de manière à prévenir ces accidents.

C. Avantages et inconvénients de la composante

96. La collecte de données sur le terrain sera le moyen le plus réaliste d'évaluer les performances de sécurité d'un système de conduite automatisé dans un large éventail de situations de circulation et de conditions environnementales réelles.

97. Les données recueillies sur le terrain sont également déterminantes pour que la base de données des scénarios soit mise à jour avec les scénarios les plus récents, en particulier ceux qui découlent de l'utilisation croissante des systèmes de conduite automatisés.

98. S'agissant des recommandations en matière de sécurité, les enseignements tirés des données de fonctionnement sont au cœur du potentiel d'amélioration de la sécurité des systèmes de conduite automatisés. Les enseignements tirés d'accidents impliquant de tels systèmes pourraient permettre de faire évoluer la sécurité de manière à prévenir lesdits accidents. Le retour d'expérience est reconnu comme une pratique optimale pour la gestion de la sécurité dans l'industrie automobile et dans d'autres domaines du transport, et est déjà en place, notamment dans les secteurs aérien, ferroviaire et maritime. Les données acquises sur le terrain peuvent également démontrer l'incidence positive des systèmes de conduite automatisés sur la sécurité routière.

99. Cette approche peut néanmoins être limitée par la quantité de données à traiter (trop de données est aussi problématique que trop peu de données), la disponibilité future d'outils de génération automatique de scénarios et la définition des responsabilités. Il convient donc de mettre en place un mécanisme proportionné, efficace et uniforme.

100. Des méthodes permettant de vérifier la fiabilité des données collectées devraient être mises au point. Les données recueillies devraient être comparables entre les constructeurs, ce qui pose le problème du choix des données à collecter et à communiquer et de la manière de procéder (définition de critères de notification appropriés). Un autre défi à relever est celui de la mise au point en temps utile d'un cadre de surveillance de la sécurité de fonctionnement afin de soutenir la commercialisation des véhicules automatisés/autonomes. La confidentialité des données devrait également être prise en compte. Il est nécessaire de définir un format normalisé pour la communication des informations, afin que les autorités puissent les traiter de manière uniforme et que les résultats puissent être facilement partagés ou analysés par d'autres autorités. Différents types de données peuvent être requis en fonction de l'objectif de la collecte de données.

101. Des processus de communication des informations issues de l'expérience sur le terrain devraient être mis au point pour le secteur automobile en tenant compte de l'accroissement du nombre de véhicules à surveiller et d'événements à enregistrer.

D. Maturité de la composante

102. La surveillance en fonctionnement et la notification sont des pratiques courantes du secteur s'agissant de l'élaboration et de l'amélioration des systèmes d'aide à la conduite (voir ISO 26262 et SOTIF¹). Elles ont été introduites dans le cadre de l'audit du nouveau Règlement ONU n° 157 sur les systèmes automatisés de maintien dans la voie. Les exigences en la matière devraient servir de point de départ à l'élaboration d'éléments supplémentaires en vue de définir une approche plus complète du partage d'informations. La surveillance en fonctionnement et la notification sont déjà mises en œuvre depuis de nombreuses années dans le cadre des règlements européens sur les émissions. Aux États-Unis, la communication d'informations a été mise en place en 1966 et officialisée sous la forme d'un système réglementaire complet de présentation de rapports de sécurité en 2000.

103. Les constructeurs ont déjà commencé à élaborer de nouveaux scénarios de circulation à partir des données du trafic, grâce au post-traitement des images et des éléments de données enregistrés (les outils permettant de générer automatiquement des scénarios complets ne sont pas encore disponibles).

104. L'analyse des accidents et incidents sur les routes est une pratique bien établie dans certains dispositifs de surveillance de la sécurité automobile ; elle s'appuie notamment sur l'analyse des données provenant des enregistreurs de données de route (EDR) des véhicules conventionnels, lesquels recueillent des informations utiles dans certaines situations d'accident². Aucun élément de données normalisé n'est actuellement défini aux fins des enquêtes sur les accidents ou les quasi-accidents impliquant des systèmes de conduite automatisés ; les entités qui procèdent à des essais ou à une mise sur le marché sont encouragées à collecter volontairement les données associées aux accidents³. Dans la mesure où le concept de surveillance en fonctionnement fait son entrée dans le domaine de la sécurité automobile et où les véhicules sont généralement utilisés par des citoyens normaux (à la différence du secteur aérien ou ferroviaire), la faisabilité de cette démarche, notamment en ce qui concerne le mode de collecte des données et les données à recueillir (par exemple, inclure ou non la question de savoir si les systèmes de conduite automatisés sont à l'origine des circonstances qui ont conduit à l'accident), est un sujet important qui doit faire l'objet d'une discussion approfondie.

105. Des mécanismes exploitant les informations issues de l'expérience sur le terrain en vue d'enrichir les connaissances communes sont déjà en place depuis des décennies dans d'autres secteurs du transport (voir le portail ECCAIRS, <http://eccairsportal.jrc.ec.europa.eu/>). Les systèmes actuels de notification des problèmes de sécurité dans l'industrie automobile sont le fruit de dizaines d'années d'expérience. Une première étape consisterait à vérifier si de tels outils peuvent également être appliqués aux systèmes de conduite automatisés. Toutefois, les efforts devraient être consacrés principalement à la définition de critères de notification communs et à l'élaboration d'un répertoire commun. Les mécanismes déjà en place dans d'autres domaines (voir, par exemple, la figure 2) prévoient que les données de fonctionnement enregistrées au sujet des événements relatifs à la sécurité (c'est-à-dire les accidents, les quasi-accidents, les anomalies de fonctionnement, etc.) soient traitées par les constructeurs ou les exploitants, qui remettent ensuite un rapport d'accident (ce qui s'est passé) aux autorités nationales. Il incombe ensuite à ces dernières d'analyser l'accident (pourquoi il s'est produit), de formuler des recommandations en matière de sécurité (comment l'éviter) et d'évaluer les incidences éventuelles sur la réglementation existante. Les informations relatives à chaque pays sont ensuite enregistrées dans :

- a) Le répertoire central des événements ;
- b) Le répertoire central des recommandations en matière de sécurité. L'accès aux données enregistrées dans le répertoire central est soumis à des règles strictes et généralement limité aux autorités compétentes. Les recommandations en matière de sécurité sont mises en

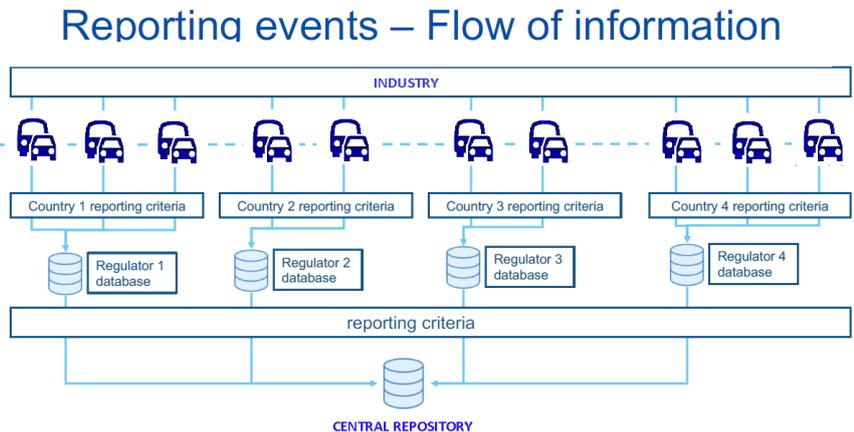
¹ Sécurité de la fonction attendue : ISO/PAS 21448.

² Voir le titre 49 du Recueil des règlements fédéraux (49 CFR Part 563, Event Data Recorders), www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2016-title49-vol6/xml/CFR-2016-title49-vol6-part563.xml.

³ Lignes directrices facultatives de la NHTSA (NHTSA Voluntary Guidance), https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13069a-ads2.0_090617_v9a_tag.pdf.

commun au niveau international, conformément au principe fondamental selon lequel la sécurité des transports est une préoccupation mondiale et que son amélioration ne doit pas être limitée par des frontières géographiques ou organisationnelles. La confidentialité est assurée à tous les niveaux. Il serait également envisageable de communiquer les données mesurées directement aux autorités, auxquelles il incomberait alors d'assurer la collecte, le stockage et le post-traitement des informations.

Figure 2

Notification des événements – flux d'informations

106. Un lien a été établi avec le groupe de travail informel des enregistreurs de données de route et des systèmes de stockage des données pour la conduite automatisée (groupe EDR/DSSAD⁴), lequel travaille déjà sur les exigences de relevé des données pour les véhicules conventionnels et automatisés, notamment en ce qui concerne l'analyse des accidents. Toutefois, l'objectif de la surveillance en fonctionnement dans le cadre de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée (valider l'évaluation du niveau de sécurité, alimenter la base de données des scénarios et analyser en détail les accidents et les incidents) diffère de celui du groupe EDR/DSSAD (reconstituer l'accident et établir les responsabilités en cas d'infraction au Code de la route).

107. Les prescriptions détaillées concernant la surveillance en fonctionnement sont énumérées à l'annexe VI.

XI. Interactions entre les composantes et les éléments de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée

108. La nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée vise à évaluer le niveau de sécurité d'un système de conduite automatisé d'une manière qui soit aussi reproductible, objective et factuelle que possible, tout en restant neutre sur le plan technologique et suffisamment souple pour favoriser l'innovation continue dans l'industrie automobile.

109. L'objectif global de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée est de vérifier, sur la base des prescriptions de sécurité, la capacité du système de conduite automatisé à gérer correctement les événements qui peuvent se produire dans le monde réel. Pour ce faire, elle étudie notamment des scénarios de circulation liés au comportement des usagers de la route et aux conditions environnementales, ainsi qu'au comportement du conducteur (interface avec l'utilisateur, par exemple) et aux défaillances du système de conduite automatisé.

110. Comme indiqué précédemment, on admet dans l'approche à plusieurs composantes qu'il est impossible d'évaluer ou de valider de manière fiable le niveau de sécurité d'un

⁴ Groupe EDR/DSSAD, <https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=87621709>.

système de conduite automatisé en s'appuyant sur une seule composante. Chacune des méthodes d'essai susmentionnées présente des avantages et des inconvénients, tels que des niveaux de contrôle de l'environnement, de reproduction de l'environnement et d'extensibilité différents.

111. Il se peut qu'une méthode d'évaluation ou d'essai ne suffise pas à elle seule pour déterminer si le système de conduite automatisé est capable de faire face à tous les événements qui peuvent se produire dans le monde réel.

112. Par exemple, bien que les essais en conditions réelles permettent de reproduire fidèlement l'environnement, il est à craindre qu'une méthode d'essai faisant appel uniquement à des scénarios sur route soit coûteuse et chronophage, offre une répétabilité limitée et présente des risques. Ainsi, les essais sur piste sont peut-être plus appropriés pour exécuter des scénarios à haut risque sans exposer les autres usagers de la route à des dommages potentiels. Il est en outre plus facile de reproduire les scénarios d'essai sur une piste fermée à la circulation que dans le monde réel. Cela dit, les scénarios d'essai sur piste peuvent être difficiles à élaborer et à mettre en œuvre, surtout si leur nombre est important et s'il s'agit de scénarios complexes comportant une grande variété d'éléments.

113. Les simulations et les essais virtuels, en revanche, sont potentiellement plus évolutifs, plus économiques, plus sûrs et plus efficaces que les essais sur piste ou en conditions réelles. Ils permettent à l'administrateur des essais de concevoir facilement et en toute sécurité un large éventail de scénarios, y compris des scénarios complexes dans lesquels divers éléments sont examinés. Les simulations peuvent cependant présenter une fidélité moindre que les autres méthodes. Il est également possible que la qualité des logiciels de simulation varie et que les essais soient difficiles à reproduire d'une plateforme de simulation à une autre.

114. La surveillance en fonctionnement et la notification peuvent aider à valider l'évaluation du niveau de sécurité menée avant la mise sur le marché et à combler les écarts observés entre les essais virtuels et les essais physiques et en conditions réelles s'agissant de la validation du niveau de sécurité. L'évaluation des performances en fonctionnement servira également à mettre à jour la base de données des scénarios avec de nouveaux scénarios découlant de l'utilisation croissante des systèmes de conduite automatisés. Enfin, le retour d'expérience peut étayer l'évaluation a posteriori des exigences réglementaires.

115. Au-delà des avantages et des inconvénients de chaque méthode d'essai, la nature des prescriptions de sécurité évaluées renseigne également sur les composantes qu'il convient d'employer.

116. Par exemple, la méthode la plus appropriée pour évaluer le niveau de sécurité global d'un système de conduite automatisé avant sa mise sur le marché peut être l'audit, en ayant recours à une approche systématique pour mener une analyse des risques. L'audit pourrait inclure des informations telles que les résultats de la validation du processus de sécurité par conception ainsi que l'analyse des données recueillies sur le terrain par le constructeur.

117. Les essais virtuels sont peut-être plus adaptés lorsqu'il est nécessaire de faire varier les paramètres de test et de réaliser un grand nombre d'essais pour étayer l'exhaustivité du scénario (par exemple, pour tester la planification et le contrôle de la trajectoire, ou évaluer la qualité de la perception avec des données préenregistrées fournies par des capteurs).

118. Il peut être préférable de recourir à des essais sur piste lorsque l'évaluation des performances d'un système de conduite automatisé ne nécessite qu'un nombre limité d'essais physiques et qu'on souhaite reproduire fidèlement l'environnement du véhicule (par exemple, pour tester l'interface avec l'utilisateur, les procédures de secours ou les situations critiques).

119. Les essais en conditions réelles peuvent quant à eux être plus appropriés lorsqu'il est impossible d'exécuter avec précision le scénario de manière virtuelle ou sur une piste d'essai (par exemple, pour tester les interactions avec les autres usagers de la route et la qualité de la perception).

120. La surveillance en fonctionnement et la notification sont le meilleur moyen de vérifier les performances d'un système de conduite automatisé sur le plan de la sécurité, après l'avoir

mis sur le marché, en bénéficiant d'un large éventail de situations de circulation et de conditions environnementales réelles.

121. Compte tenu des remarques précédentes, la composition des méthodes d'essai utilisées pour évaluer chaque prescription de sécurité ainsi que l'ordre dans lequel elles sont mises en œuvre peuvent varier. Si certaines de ces méthodes suivent un ordre logique – essais virtuels, sur piste, puis en conditions réelles –, il est possible de s'en écarter en fonction de la prescription de sécurité à tester.

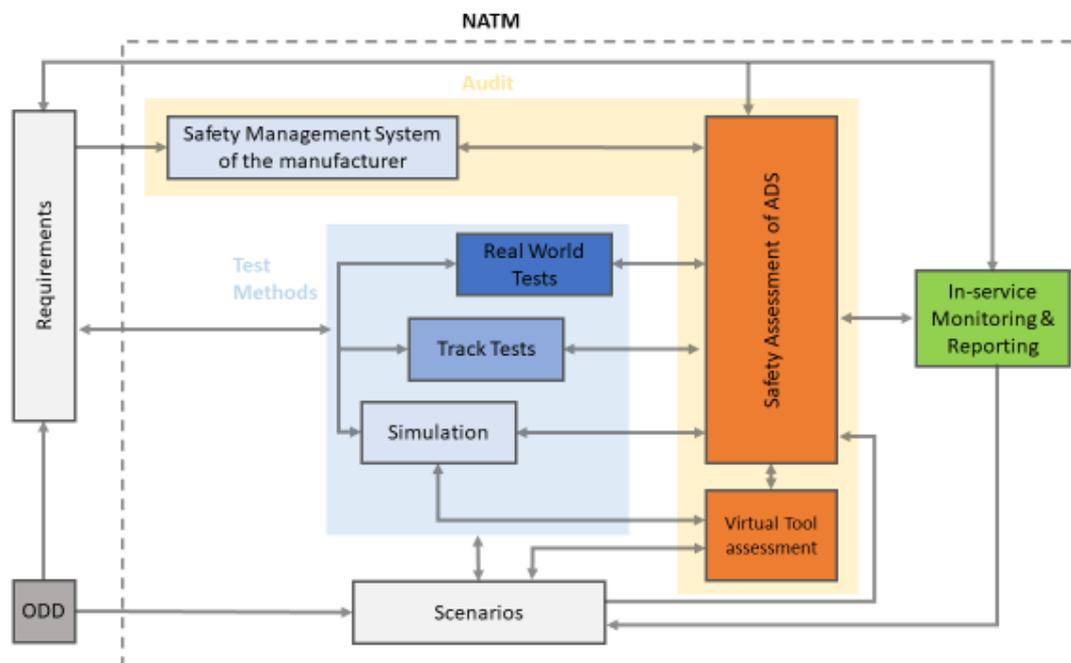
122. Il est donc nécessaire d'utiliser les composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée conjointement, en tenant compte de leurs avantages et de leurs inconvénients, pour obtenir une procédure efficace, complète et cohérente. Les composantes devraient se compléter, les chevauchements ou les redondances excessifs étant évités, de sorte que la stratégie de validation soit efficace et efficiente.

123. Comme indiqué précédemment, les composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée comprennent non seulement les trois méthodes d'essai susmentionnées, mais aussi une analyse globale (fondée par exemple sur l'audit, l'évaluation, la surveillance en fonctionnement et la notification). Si les méthodes d'essai visent à évaluer le niveau de sécurité des systèmes de conduite automatisés, la composante Audit et évaluation permettra d'apprécier également la robustesse des stratégies et des processus de l'entreprise. Les éléments de l'audit sont les suivants :

- a) Évaluation de la robustesse du système de gestion de la sécurité ;
- b) Évaluation des dangers et des risques (identifiés) propres au système ;
- c) Évaluation de la stratégie de vérification (plan et matrice de vérification, par exemple), qui décrit la stratégie de validation et l'utilisation intégrée des composantes en vue d'assurer une couverture adéquate ;
- d) Évaluation du niveau de conformité aux exigences atteint grâce à une utilisation intégrée de toutes les composantes, y compris la cohérence entre les résultats d'une composante en tant qu'informations fournies à une autre composante (en amont et en aval), et l'utilisation adéquate des scénarios. Ce niveau de conformité concerne aussi bien les véhicules neufs que les véhicules en service ;
- e) La phase d'audit et d'évaluation intègre également les résultats des essais virtuels, sur piste et en conditions réelles effectués par le constructeur.

124. Le diagramme de la figure 3 illustre les interactions entre les composantes, les scénarios et les prescriptions de sécurité (élaborées par le groupe FRAV). Chacun de ces éléments est examiné plus en détail dans les sections suivantes du présent document.

Figure 3
**Relations entre les composantes et les scénarios conçus par le groupe VMAD
 et les prescriptions de sécurité élaborées par le groupe FRAV**



XII. Intégration

125. Le présent document décrit une méthode de validation générique. Le groupe FRAV développe lui aussi des prescriptions génériques pour le produit à valider. Entre les deux, la relation est évidente : les prescriptions fonctionnelles peuvent affecter les exigences de validation et inversement. À ce jour, le groupe FRAV a établi une liste de 28 prescriptions fonctionnelles de haut niveau (FRAV-05). Le détail des prescriptions fonctionnelles devra permettre de vérifier leur éventuelle incidence sur les méthodes de validation. Cette activité est gérée moyennant la participation commune des représentants des deux groupes de travail informels aux réunions.

126. Les différentes sections du présent document seront mises à jour au fur et à mesure de l'élaboration des prescriptions de sécurité et des aspects techniques de chacune des composantes, afin d'inclure des informations supplémentaires. Pour faciliter la compréhension, il est prévu que la présente section comprenne également des exemples de la façon dont les composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée peuvent être appliquées à certaines capacités fonctionnelles d'un système de conduite automatisé (la conduite sur autoroute, par exemple) en fonction des prescriptions de sécurité définies.

Annexe I

Glossaire (projet)

On entend par *scénario complexe* un scénario de circulation comportant une ou plusieurs situations impliquant un grand nombre d'autres usagers de la route, une infrastructure routière inattendue ou des conditions géographiques ou environnementales anormales.

On entend par *scénario critique* un scénario de circulation comportant une situation dans laquelle le système de conduite automatisé doit effectuer une manœuvre d'urgence afin d'éviter une collision potentielle ou d'en atténuer les effets, ou répondre à une défaillance du système.

On entend par *cas limite* une situation rare qui nécessite néanmoins d'accorder une attention particulière à la conception pour que le véhicule automatisé/autonome puisse la gérer de manière raisonnablement sûre. La notion de rareté est relative et fait généralement référence à des situations ou à des conditions qui se produiront assez souvent dans une flotte déployée à grande échelle pour constituer un problème, mais qui n'ont peut-être pas été prises en compte dans le processus de conception. Les cas limites peuvent être des événements inattendus isolés, comme la présence d'un panneau de signalisation atypique ou d'un animal inhabituel sur une autoroute.

On entend par *scénario nominal* un scénario de circulation comportant des situations qui reproduisent des manœuvres de conduite courantes et non critiques.

On entend par *spécifications du scénario d'essai* la description détaillée des tâches que l'administrateur des essais doit accomplir pour préparer le test.

On entend par *méthode d'essai* une approche formalisée permettant de générer de manière cohérente des connaissances sur un système de conduite automatisé en effectuant des essais, par exemple des essais virtuels dans des environnements simulés, des essais physiques et structurés dans des environnements contrôlés et des essais en conditions réelles sur route.

On entend par *scénario de circulation* (ou *scénario*) une séquence ou combinaison de situations permettant d'évaluer les prescriptions de sécurité d'un système de conduite automatisé. Les scénarios comprennent une tâche de conduite dynamique, ou une séquence de tâches de conduite dynamique. Ils peuvent également comprendre une grande diversité d'éléments, tels que tout ou partie de la tâche de conduite dynamique, différents tracés de routes, différents types d'usagers de la route, différents types d'objets statiques, ou présentant des comportements dynamiques divers, et différentes conditions environnementales (parmi de nombreux autres facteurs).

Annexe II

Scénarios fonctionnels applicables aux routes à chaussées séparées

Table des matières

	<i>Page</i>
I. Introduction.....	30
II. Contributions à la présente annexe	30
III. Éléments de base des scénarios fonctionnels.....	30
IV. Couverture.....	30
V. Symboles utilisés dans le présent document.....	31
VI. Liste de scénarios possibles pour les essais du système de conduite automatisé sur autoroute de niveau 3	31
A. Conduite normale (maintien dans la voie).....	33
1. Conduite normale (maintien dans la voie).....	33
B. Interaction avec d'autres véhicules ou objets	34
1. Changement de voie	35
2. Freinage critique (d'urgence) sans changement de voie	36
C. Détection des règles de circulation et des équipements routiers et réaction à ceux-ci	40
D. Géométrie de la route propre au pays	42
E. Situation inhabituelle	43
VII. Références.....	44

I. Introduction

1. La présente section est une synthèse des divers scénarios de circulation récemment élaborés, dont l'objectif est d'établir une liste de scénarios fonctionnels pour les essais des systèmes de conduite automatisés sur autoroute. Il est envisagé d'y inclure certains scénarios logiques, ou certaines façons possibles de les décrire, comme convenu dans le cadre de la discussion en cours. Le domaine de conception fonctionnelle est le suivant : autoroute, vitesse maximale de 130 km/h, changements de voie autorisés.

II. Contributions à la présente annexe

2. Les contributions suivantes ont été prises en compte :
- a) Règlement ONU n° 157 (systèmes automatisés de maintien dans la voie) dans sa version actuelle ;
 - b) Catégories de scénarios TNO (V1.7, Pays-Bas) ;
 - c) Bibliothèque de scénarios SAFE (Fortellix) ;
 - d) Scénarios d'accidents mis à disposition par le Japon ;
 - e) Scénarios fonctionnels proposés par la Chine (CATARC) ;
 - f) Scénarios élaborés par le Centre commun de recherche ;
 - g) Catalogue de types de conflits mis à disposition par l'Allemagne (IGLAD).
3. Les éléments fournis par le Japon, les Pays-Bas, SAFE et la Chine ont été soumis pour examen et discussion à la réunion du groupe VMAD (sous-groupe 1) qui s'est tenue le 10 décembre 2020 ; la proposition de l'Allemagne a été communiquée le 16 décembre 2020.

III. Éléments de base des scénarios fonctionnels

4. Les scénarios fonctionnels peuvent couvrir un certain nombre d'éléments (par exemple, la géométrie de la route à différents niveaux d'abstraction, le comportement du véhicule soumis à l'essai et les objets mobiles ou statiques).
5. Les facteurs supplémentaires qui ne sont pas couverts par les scénarios fonctionnels (par exemple, les vitesses, les accélérations, les positions, les conditions environnementales, les défaillances, les erreurs de communication ou la géométrie des routes à des niveaux plus détaillés) devraient être traités par un scénario logique.
6. La répartition des éléments entre les scénarios fonctionnels et logiques (c'est-à-dire la question de savoir quels facteurs devraient être pris en compte par quel type de scénario) n'ayant pas encore été débattue et arrêtée, la classification présentée dans le présent document est une version initiale qui sera mise à jour au fil des discussions.

IV. Couverture

7. Compte tenu du fait que les collisions impliquent toujours d'autres véhicules ou des objets (en supposant que ceux-ci puissent fonctionner correctement en l'absence d'autres véhicules ou objets), et que les 24 scénarios fonctionnels illustrés ci-après peuvent rendre compte de toutes les interactions entre d'autres véhicules ou objets et le véhicule soumis à l'essai, on peut considérer que ces scénarios couvrent correctement les collisions avec d'autres véhicules ou objets.
8. Comme indiqué précédemment, les facteurs non couverts par les scénarios fonctionnels proposés (par exemple, la vitesse initiale du véhicule soumis à l'essai, la taille, la position initiale, la vitesse initiale, l'accélération des autres véhicules ou objets), les facteurs influant sur la perception (par exemple, les conditions météorologiques, la luminosité, l'angle mort, les faux positifs, les clignotants des autres véhicules) et les facteurs

influant sur la stabilité du véhicule (par exemple, la courbe, la pente, le revêtement, le vent, etc.) peuvent être décrits au moyen de paramètres dans des scénarios logiques.

9. Il est possible d'ajouter des scénarios fonctionnels à tout moment si le sous-groupe 1 et le groupe VMAD en conviennent.

V. Symboles utilisés dans le présent document

SYMBOLE	DESCRIPTION
	Véhicule soumis à l'essai
	Véhicule aval
	Autres véhicules faisant partie du scénario
	Obstacle infranchissable sur la trajectoire prévue
	Obstacle franchissable sur la trajectoire prévue

VI. Liste de scénarios possibles pour les essais du système de conduite automatisé sur autoroute de niveau 3

10. Tableau récapitulatif des contributions du sous-groupe 1 du groupe VMAD

Famille de scénarios		Sous-scénario	Scénarios d'accidents (Japon)	Catégories de scénarios (Pays-Bas, TNO)	Bibliothèque de scénarios (SAFE)	Scénarios fonctionnels (Chine, CATARC)	Catalogue de types de conflit (Allemagne)
A. Conduite normale	1. Maintien dans la voie	a. Conduite en ligne droite		X	X	X	X
		b. Négociation de virage		X	X	X	X
B. Interaction avec d'autres véhicules ou objets	1. Changement de voie	a. Changement de voie du véhicule soumis à l'essai en présence d'un véhicule amont	X	X			X
		b. Insertion sur l'autoroute	X		X	X	X
		c. Insertion en fin de voie	X		X		X
		d. Insertion dans une voie occupée	X	X			X
	2. Freinage critique (d'urgence) sans changement de voie	a. Obstacle infranchissable sur la trajectoire prévue	X	X	X		X
		b. Obstacle franchissable sur la trajectoire prévue	X	X		X	X
		c. Freinage du véhicule aval	X	X	X	X	X

Famille de scénarios		Sous-scénario	Scénarios d'accidents (Japon)	Catégories de scénarios (Pays-Bas, TNO)	Bibliothèque de scénarios (SAFE)	Scénarios fonctionnels (Chine, CATARC)	Catalogue de types de conflit (Allemagne)
		d. Présence d'un véhicule aval plus lent ou à l'arrêt	X	X	X	X	X
		e. Queue de poisson	X	X	X	X	X
		f. Sortie de voie	X	X	X	X	X
		g. Détection des véhicules faisant des embardées et réaction à ceux-ci	X	X	X		X
C. Détection des règles de circulation et des équipements routiers et réaction à ceux-ci		a. Panneau de limitation de vitesse			X	X	
		b. Feux de signalisation				X	X
		c. Traversée d'un tunnel				X	
		d. Péage				X	
		e. Obstacles classiques				X	X
D. Géométrie de la route spécifique au pays		a. Véhicule à une intersection			X		
E. Situation inhabituelle		a. Conducteur à contresens (venant en sens inverse)			X		X

11. Notes sur les contributions des membres du sous-groupe 1 du groupe VMAD :

- Scénarios fonctionnels (Chine, CATARC) : Il s'agit d'une liste extraite d'un catalogue général décrivant différents domaines de conception fonctionnelle, tels que « Route classique », « Voie rapide urbaine » ou « Autoroute », et les éléments à détecter, notamment « Panneau de limitation de vitesse », « Ligne de délimitation de voies », « Péage », etc. Les scénarios fonctionnels proposés ci-après dans le présent document sont beaucoup plus génériques que ceux évoqués par la Chine, qui constituent donc un sous-ensemble de la présente liste. Par exemple, les éléments « Péage » ou « Obstacles classiques » proposés par la Chine sont compatibles avec la rubrique « Obstacle infranchissable sur la trajectoire prévue » de la présente liste de scénarios.
- Catégories de scénarios (Pays-Bas, TNO) : Il s'agit d'un catalogue de scénarios très complet contenant beaucoup plus de scénarios que nécessaire pour une utilisation sur autoroute. La terminologie et les descriptions ont été soigneusement réfléchies. Il est possible de créer des scénarios en associant des étiquettes correspondant à différentes couches.
- Scénarios d'accidents (Japon) : Il s'agit de scénarios portant uniquement sur les interactions avec d'autres véhicules. Ils décrivent les différentes géométries de la route et les positions que peuvent occuper les autres véhicules autour du véhicule soumis à l'essai. Tous les autres paramètres sont considérés comme des caractéristiques (accélération, décélération, changement de voie, maintien dans la voie, etc.).

- Bibliothèque de scénarios (SAFE) : Il s'agit d'une liste de scénarios, accompagnés d'exemples très concrets ou plus généraux. Le dépassement de véhicules se déplaçant lentement sur la voie adjacente et le dépassement de véhicules à l'arrêt sont traités dans deux scénarios différents, mais la conduite derrière un véhicule ne fait l'objet que d'un seul scénario.
- Catalogue de types de conflits (Allemagne) : Il s'agit d'une liste de types de conflits, qui est utilisée notamment par les enquêteurs pour classer dans différentes catégories les scénarios conduisant à des accidents. Le catalogue distingue les conflits selon qu'ils impliquent ou non un autre usager de la route. Il utilise des symboles différents de ceux des autres documents pour décrire un scénario ou une situation (principalement divers types de flèches). La conduite à droite et la conduite à gauche sont traitées séparément. Le catalogue contient 251 scénarios répartis en sept grands types de conflits, tels que « circulation longitudinale » ou « piéton traversant la route ».

12. *Remarque* : Les paramètres figurant dans les rubriques « Principaux paramètres du scénario » et « Paramètres étudiés » de la présente section sont donnés à titre d'exemples. D'autres paramètres peuvent être essentiels pour les essais de validation.

A. Conduite normale (maintien dans la voie)

1. Conduite normale (maintien dans la voie)

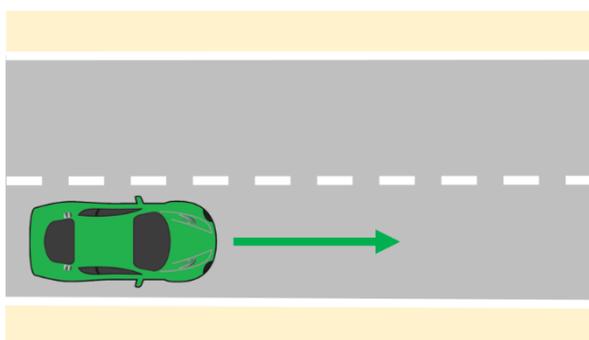
13. *Remarque* : Le maintien dans la voie jusqu'à 60 km/h est abordé dans le Règlement ONU n° 157 relatif à l'homologation des systèmes automatisés de maintien dans la voie (ALKS). Les scénarios fonctionnels de maintien dans la voie peuvent être classés en deux catégories en fonction de la géométrie de la route. Ils peuvent également être répartis en plusieurs groupes en fonction de la voie dans laquelle se trouve le véhicule : centrale, de gauche, de droite, etc.

a) Conduite en ligne droite

- Sans véhicule aval ;
- Avec véhicule aval ;
- Avec d'autres véhicules sur les voies adjacentes (en mouvement ou arrêtés).

Figure 1

Représentation schématique : conduite en ligne droite



14. Description générale :

- Le véhicule soumis à l'essai roule sur une route rectiligne. L'objectif de ce scénario est de tester la capacité du véhicule à rester dans sa voie dans des conditions normales ou difficiles [1, 2, 4].
- Principaux paramètres du scénario : vitesse du véhicule soumis à l'essai (règles de circulation), largeur de la voie, profil de vitesse du véhicule aval (le cas échéant), disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant).
- Paramètres étudiés : déviation par rapport au centre de la voie (valeur nominale et distribution), déviation par rapport à la vitesse désirée, respect des changements de

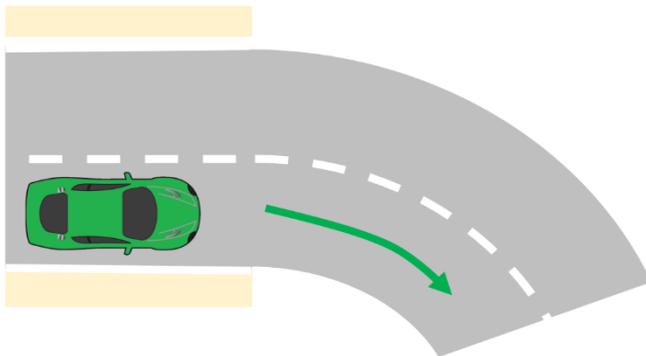
vitesse, variations dans le temps, distance entre le véhicule soumis à l'essai et le véhicule aval (le cas échéant), réaction aux autres véhicules, etc.

b) *Négociation de virage (à droite et à gauche)*

- a) Sans véhicule aval ;
- b) Avec véhicule aval ;
- c) Avec d'autres véhicules sur les voies adjacentes (en mouvement ou arrêtés).

Figure 2

Représentation schématique : négociation de virage



15. Description générale :

- Le véhicule soumis à l'essai aborde un virage. L'objectif de ce scénario est de tester la capacité du véhicule à gérer les courbures de la route définies dans le domaine de conception fonctionnelle [1, 2, 4].
- Principaux paramètres du scénario : vitesse du véhicule soumis à l'essai (règles de circulation), largeur de la voie, profil de vitesse du véhicule aval (le cas échéant), disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant).
- Paramètres étudiés : déviation par rapport au centre de la voie (valeur nominale et distribution), déviation par rapport à la vitesse désirée, respect des changements de vitesse, variations dans le temps, distance entre le véhicule soumis à l'essai et le véhicule aval (le cas échéant), distance par rapport aux autres véhicules, etc.

B. Interaction avec d'autres véhicules ou objets

16. Les 24 scénarios illustrés ci-dessous peuvent rendre compte des interactions avec d'autres véhicules roulant dans la même direction sur la même voie ou sur des voies adjacentes.

		Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior				
		Cut in	Cut out	Acceleration	Deceleration (Stop)	
Road Geometry and Ego-vehicle behavior	Main roadway	Lane keep	No.1	No.2	No.3	No.4
		Lane change	No.5	No.6	No.7	No.8
	Marge	Lane keep	No.9	No.10	No.11	No.12
		Lane change	No.13	No.14	No.15	No.16
	Branch	Lane keep	No.17	No.18	No.19	No.20
		Lane change	No.21	No.22	No.23	No.24

17. Dans les 12 scénarios avec changement de voie du véhicule soumis à l'essai, le véhicule le plus proche de lui ne se trouve pas nécessairement sur la même voie ou sur une voie adjacente ; il peut se trouver à deux voies de distance. Même dans ces circonstances, il doit être détecté par le véhicule soumis à l'essai, car les deux peuvent interagir l'un avec l'autre s'ils changent simultanément de voie. Pour décrire correctement ces situations dans les 12 scénarios, il convient d'inclure certains paramètres tels que le « nombre de voies », la « voie du véhicule soumis à l'essai » et la « position relative entre le véhicule soumis à l'essai et l'autre véhicule ». Les exemples de « route principale » sont présentés ci-dessous. D'autres cas de « route fusionnée » et de « route ramifiée » sont également à prendre en compte.

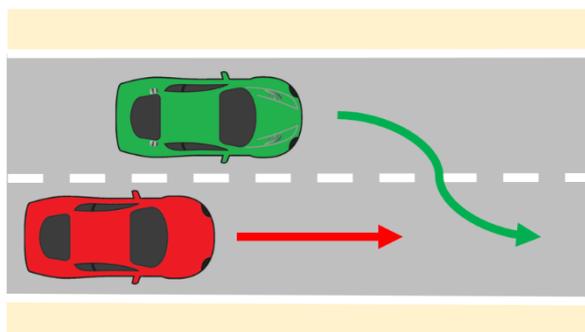
1. Changement de voie

Remarque : Les scénarios de changement de voie sont compliqués par le fait qu'il est impossible d'obliger le système de conduite automatisé à changer de voie. En outre, la fonctionnalité et les principes du changement de voie (tels que les exigences techniques, les définitions, les critères d'activation, l'indication du changement de voie, etc.) seront définis à un stade ultérieur.

18. Les changements de voie peuvent être classés en fonction du nombre de véhicules présents sur la voie de destination. Si l'espace est suffisant pour effectuer le changement de voie, il n'est pas nécessaire de coopérer avec les autres véhicules. Si la voie de destination est occupée par d'autres usagers de la route, le véhicule soumis à l'essai doit s'adapter à leur comportement et s'insérer.

- a) *Changement de voie du véhicule soumis à l'essai en présence d'un véhicule amont*

Figure 3
Représentation schématique : changement de voie



19. Description générale :

- Un autre véhicule se trouvant dans une voie adjacente roule dans la même direction que le véhicule soumis à l'essai. L'intention du véhicule soumis à l'essai est de passer sur la voie dans laquelle circule l'autre conducteur [1, 3].
- Principaux paramètres du scénario : moment du changement de voie, vitesse du véhicule soumis à l'essai (règles de circulation), largeur de la voie, profil de vitesse du véhicule aval (le cas échéant), disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant).
- Paramètres étudiés : déviation par rapport aux centres des voies (valeur nominale, dépassement), moment du changement de voie (vitesse transversale du véhicule soumis à l'essai), distance entre le véhicule soumis à l'essai et le véhicule aval (le cas échéant), distance par rapport aux autres véhicules, etc.

b) *Insertion sur une autoroute*

Aucune description n'a été fournie.

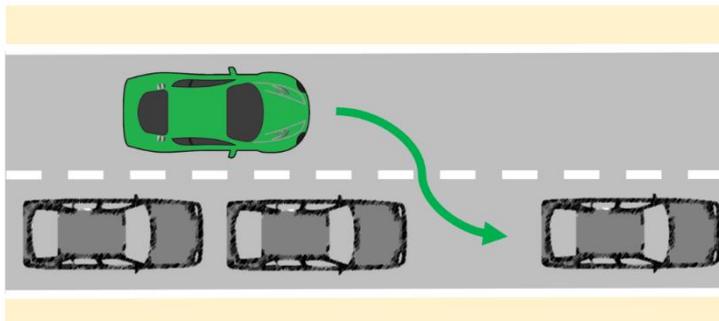
c) *Insertion en fin de voie*

Aucune description n'a été fournie.

d) *Insertion dans une voie occupée*

Figure 4

Représentation schématique : insertion dans une voie occupée



20. Description générale :

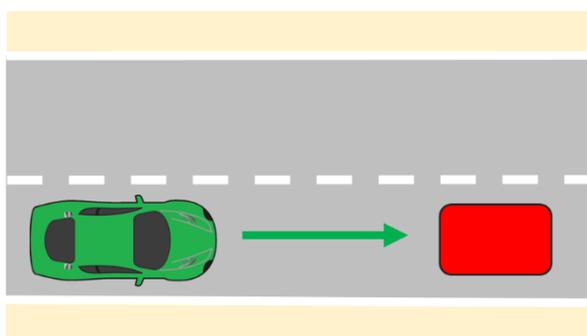
- Des véhicules occupent la voie adjacente à celle du véhicule soumis à l'essai. L'intention du véhicule soumis à l'essai est de passer sur la voie dans laquelle circulent les autres conducteurs [1-4]. Le niveau de difficulté du scénario dépend de la géométrie de la route, de la vitesse, et du nombre et de la disposition des autres véhicules.
- Principaux paramètres du scénario : tracé de la route, disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant), vitesse du véhicule soumis à l'essai (règles de circulation), largeur des voies, etc.
- Paramètres étudiés : distance par rapport aux autres véhicules, moment du changement de voie (vitesse transversale du véhicule soumis à l'essai), etc.

2. Freinage critique (d'urgence) sans changement de voie

Remarque : Cette famille de scénarios comprend un certain nombre de scénarios fonctionnels critiques. Comme le montre également le tableau récapitulatif des contributions, la plupart des membres du sous-groupe 1 ont mis ces scénarios en évidence dans leurs documents.

- a) *Obstacle infranchissable sur la trajectoire prévue (y compris d'autres voitures et des usagers de la route vulnérables)*

Figure 5

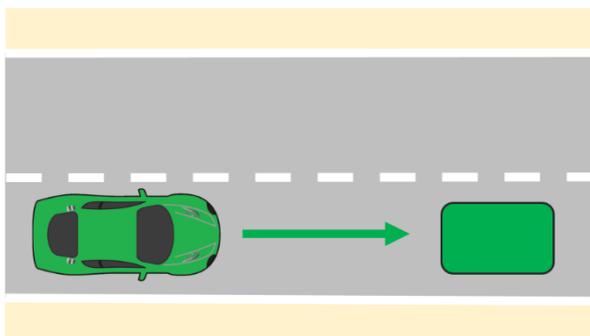
Représentation schématique : obstacle infranchissable

21. Description générale :

- Le véhicule soumis à l'essai circule sur une voie sur laquelle se trouve un obstacle infranchissable. L'objectif du véhicule soumis à l'essai est de continuer à rouler en ligne droite. Le véhicule soumis à l'essai doit réagir [1, 2]. Le niveau de gravité du scénario dépend de la vitesse du véhicule soumis à l'essai.
- Principaux paramètres du scénario : tracé de la route (visibilité de l'obstacle se trouvant sur la trajectoire), disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant), vitesse du véhicule soumis à l'essai.
- Paramètres étudiés : réaction du véhicule soumis à l'essai (changement de voie ou freinage), distance par rapport à l'obstacle, vitesse transversale du véhicule soumis à l'essai (en cas de changement de voie), etc.

- b) *Obstacle franchissable sur la trajectoire prévue (par exemple, une plaque d'égout)*

Figure 6

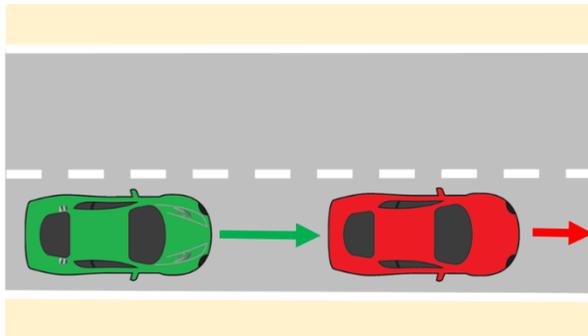
Représentation schématique : obstacle franchissable

22. Description générale :

- Le véhicule soumis à l'essai circule sur une voie sur laquelle se trouve un obstacle franchissable, par exemple une plaque d'égout ou une branche de faible diamètre. L'objectif du véhicule soumis à l'essai est de continuer à rouler en ligne droite. Le véhicule soumis à l'essai doit réagir [1, 4]. Le niveau de difficulté du scénario dépend de la vitesse du véhicule soumis à l'essai.
- Principaux paramètres du scénario : tracé de la route (visibilité de l'obstacle se trouvant sur la trajectoire), disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant), vitesse du véhicule soumis à l'essai.
- Paramètres étudiés : réaction du véhicule soumis à l'essai (faux positif, changement de voie ou freinage), distance par rapport à l'obstacle, vitesse transversale du véhicule soumis à l'essai (en cas de changement de voie), etc.

c) *Freinage du véhicule aval*

Figure 7

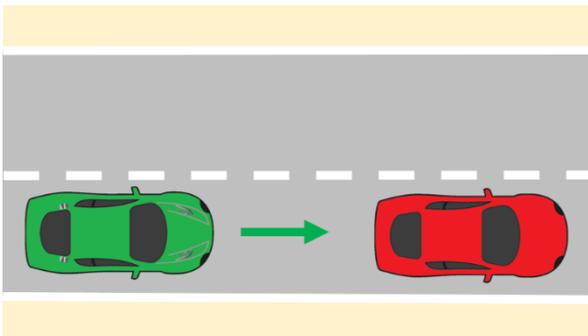
Représentation schématique : freinage du véhicule aval

23. Description générale :

- Le véhicule soumis à l'essai roule derrière un véhicule aval. Le véhicule aval freine, le véhicule soumis à l'essai doit adapter sa vitesse afin de maintenir la distance de sécurité avec le véhicule aval [1-4].
- Principaux paramètres du scénario : vitesse du véhicule soumis à l'essai (règles de circulation), profil de vitesse du véhicule aval (décélération), disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant).
- Paramètres étudiés : distance entre le véhicule soumis à l'essai et le véhicule aval, réaction aux autres véhicules circulant sur les voies adjacentes, etc.

d) *Présence d'un véhicule aval plus lent ou à l'arrêt*

Figure 8

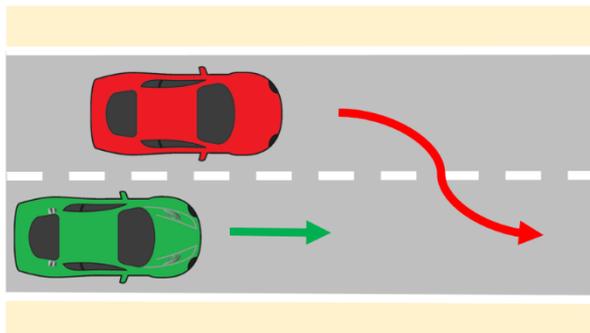
Représentation schématique : véhicule aval plus lent ou à l'arrêt

24. Description générale :

- Le véhicule aval roule plus lentement que le véhicule soumis à l'essai. Le véhicule soumis à l'essai peut freiner ou changer de voie pour éviter une collision [1-4]. Le niveau de gravité du scénario dépend des vitesses respectives du véhicule aval et du véhicule soumis à l'essai.
- Principaux paramètres du scénario : vitesse du véhicule soumis à l'essai (règles de circulation), profil de vitesse du véhicule aval (décélération), disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant).
- Paramètres étudiés : distance entre le véhicule soumis à l'essai et le véhicule aval, réaction aux autres véhicules circulant sur les voies adjacentes, etc.

e) *Queue de poisson*

Figure 9

Représentation schématique : queue de poisson

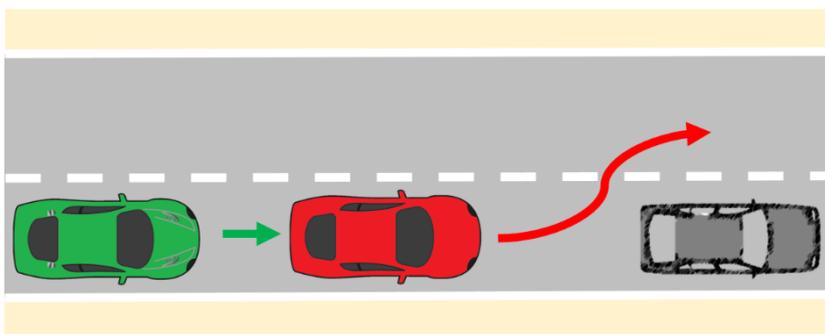
25. Description générale :

- Un autre véhicule se trouvant dans une voie adjacente roule dans la même direction que le véhicule soumis à l'essai. L'autre véhicule change de voie et devient le véhicule aval du véhicule soumis à l'essai [1-4]. Le niveau de gravité du scénario dépend de la distance entre les deux véhicules et de la vitesse transversale du véhicule aval.
- Principaux paramètres du scénario : vitesse transversale du véhicule aval, distance par rapport au véhicule aval, vitesse du véhicule soumis à l'essai, largeur de la voie, disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant).
- Paramètres étudiés : distance entre le véhicule soumis à l'essai et le véhicule aval, distance par rapport aux autres véhicules, etc.

f) *Sortie de voie*

- Sortie de voie pour rejoindre une sortie d'autoroute ;
- Sortie de voie pour changer de voie

Figure 10

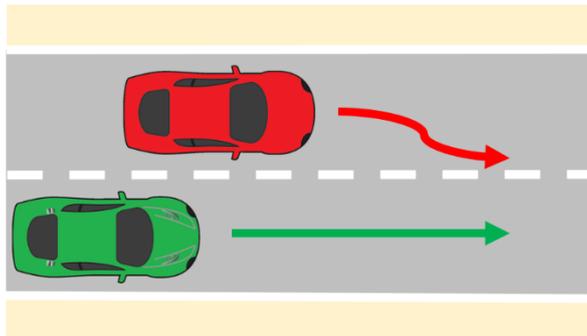
Représentation schématique : sortie de voie

26. Description générale :

- Le véhicule soumis à l'essai roule derrière un véhicule aval. Le véhicule aval change de voie et n'est donc plus le véhicule aval du véhicule soumis à l'essai [1-4]. Un obstacle est présent dans la voie sur laquelle circule le véhicule soumis à l'essai. Le niveau de difficulté du scénario dépend de la vitesse du véhicule soumis à l'essai et de la vitesse transversale du véhicule aval.
- Principaux paramètres du scénario : vitesse transversale du véhicule aval, distance par rapport au véhicule aval, vitesse du véhicule soumis à l'essai, largeur de la voie, disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant).
- Paramètres étudiés : distance entre le véhicule soumis à l'essai et l'obstacle, distance par rapport aux autres véhicules, etc.

g) *Détection des véhicules faisant des embardées et réaction à ceux-ci*

Figure 11

Représentation schématique : véhicule faisant des embardées

27. Description générale :

- Un autre véhicule se trouvant dans une voie adjacente roule dans la même direction que le véhicule soumis à l'essai. L'autre véhicule fait une embardée vers la voie du véhicule soumis à l'essai [1-3].
- Principaux paramètres du scénario : vitesse transversale de l'autre véhicule, vitesse du véhicule soumis à l'essai, largeur de la voie, disposition et profil de vitesse des autres véhicules (le cas échéant).
- Paramètres étudiés : distance entre le véhicule soumis à l'essai et le véhicule faisant des embardées, distance par rapport aux autres véhicules, etc.

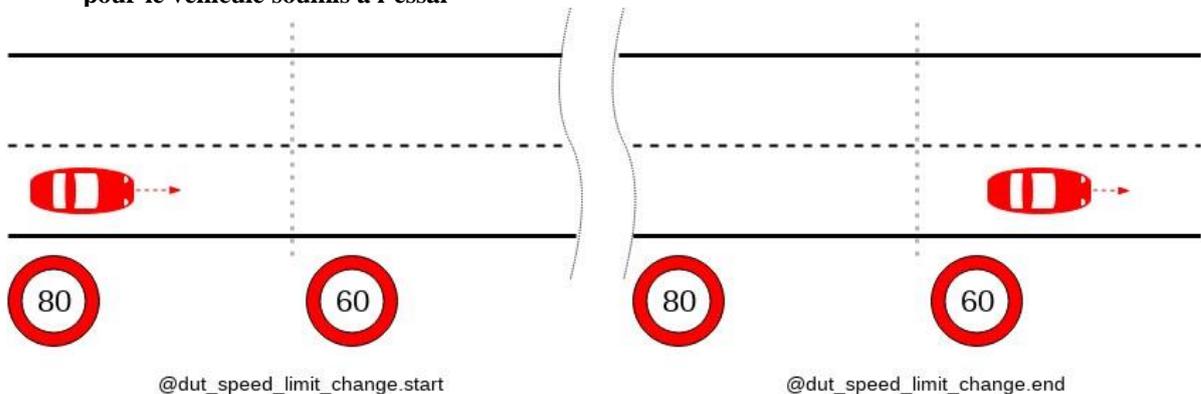
C. Détection des règles de circulation et des équipements routiers et réaction à ceux-ci

Remarque : Ces scénarios sont implicitement présents dans presque tous les documents, mais sont parfois traités comme des équipements routiers spéciaux. Ils doivent être considérés comme susceptibles de se produire simultanément avec d'autres scénarios. Il convient également de noter que les règles de circulation sont différentes selon les pays ou les régions.

a) *Panneau de limitation de vitesse*

28. Ce scénario demande au véhicule soumis à l'essai de répondre de manière appropriée aux changements de limites de vitesse en décélérant lorsqu'il entre dans une zone où la limite de vitesse diminue et en accélérant lorsqu'il aborde une zone où la limite de vitesse augmente. Dans l'exemple ci-dessous, la vitesse maximale passe de 80 km/h à 60 km/h.

Figure 12

Représentation schématique : changement de limite de vitesse pour le véhicule soumis à l'essai

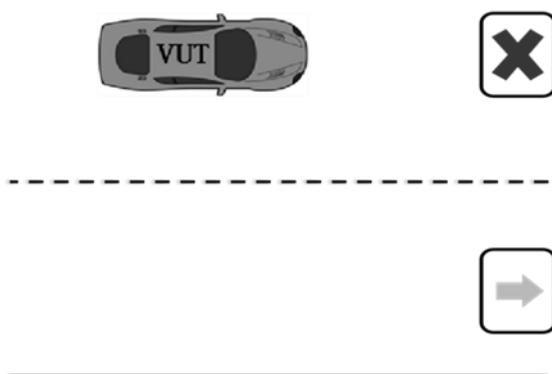
29. Environnement requis : une route sur laquelle la limite de vitesse change au moins une fois.
30. Comportement du véhicule soumis à l'essai : le véhicule soumis à l'essai circule sur la route et est censé adapter sa vitesse en fonction des changements de limitation.
31. Le véhicule soumis à l'essai s'insère en fin de voie.

b) *Feux de signalisation*

32. Environnement requis : une route comportant au moins deux voies. Les feux de signalisation sont placés au-dessus de la route, et les feux de signalisation des voies adjacentes sont maintenus au vert.

Figure 13

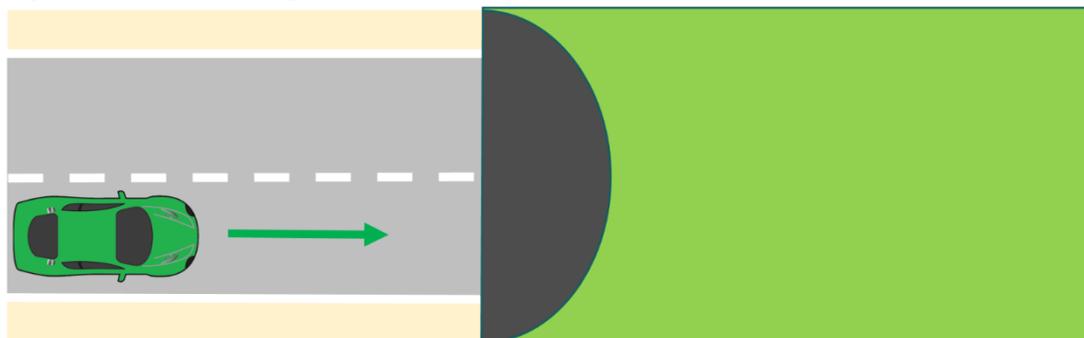
Représentation schématique : feux de signalisation sur voies rapides



c) *Traversée d'un tunnel*

Figure 14

Représentation schématique : traversée d'un tunnel



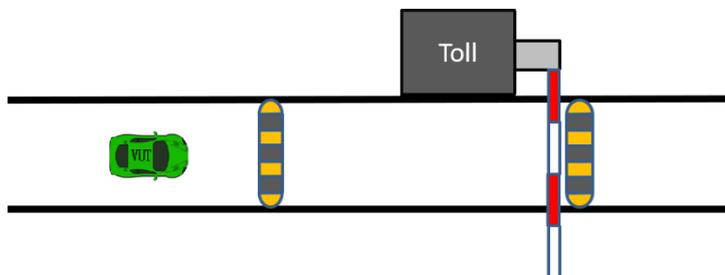
33. Description générale :

- Le véhicule soumis à l'essai traverse un tunnel (absence de signaux GPS et de lumière naturelle) [4]. Le véhicule doit s'adapter à l'éclairage qui change rapidement et à l'absence de signaux GPS. Le niveau de difficulté du scénario dépend de la vitesse du véhicule soumis à l'essai, de la différence de luminosité entre l'extérieur et l'intérieur du tunnel et de la longueur du tunnel.
- Principaux paramètres du scénario : vitesse du véhicule soumis à l'essai, luminosité.
- Paramètres étudiés : vitesses transversale et longitudinale du véhicule soumis à l'essai, déviation par rapport au centre de la voie, etc.

d) *Péage*

34. Environnement requis : une longue route rectiligne comprenant au moins une voie. Cette section de route comporte un péage, et des panneaux indiquant la présence de la station de péage, des panneaux de limitation de vitesse et des ralentisseurs sont installés en amont de la station de péage, comme illustré à la figure 15.

Figure 15

Représentation schématique : franchissement d'une station de péagee) *Obstacles classiques*

35. Environnement requis : une longue route rectiligne comprenant au moins deux voies. La ligne séparant ces deux voies est une ligne pointillée blanche. Des cônes et des panneaux de signalisation sont placés sur ces voies, de manière à répondre aux exigences de contrôle de la circulation de l'opération d'entretien de la route, comme illustré à la figure 16.

Figure 16

Représentation schématique : franchissement d'obstacles classiques**D. Géométrie de la route propre au pays**

Remarque : Ce scénario ne concerne qu'un nombre limité de pays ou de régions ; la pertinence de sa mise en œuvre dépend donc du marché cible du système de conduite automatisé.

a) *Véhicule à une intersection*

36. Les carrefours représentent un défi pour le véhicule soumis à l'essai en raison de la probabilité accrue de conflits avec d'autres usagers de la route.

37. Dans ce scénario, le véhicule soumis à l'essai traverse une intersection en même temps qu'une autre voiture. Ce scénario teste le comportement du véhicule soumis à l'essai lorsqu'il se trouve sur une trajectoire de collision avec une autre voiture à une intersection, éventuellement équipée de panneaux, de signaux ou de feux de signalisation. Le véhicule soumis à l'essai doit être en mesure de traverser l'intersection en toute sécurité et d'éviter la collision ou d'en atténuer les effets.

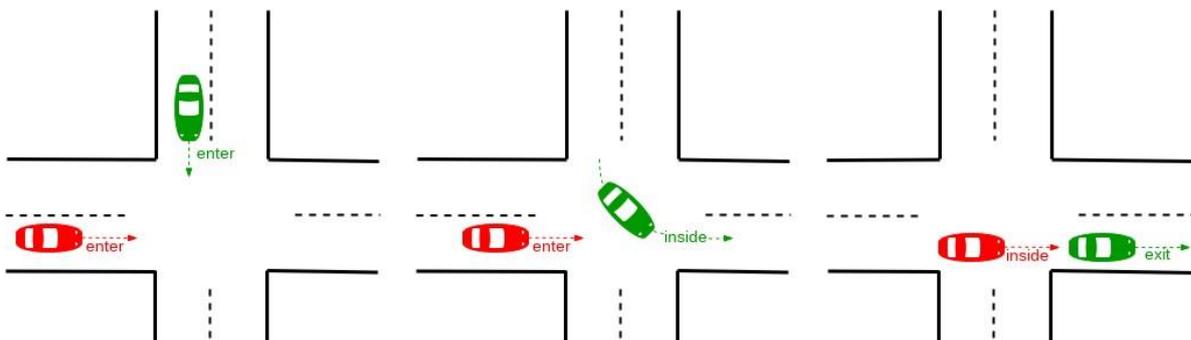
38. Environnement requis : une intersection comportant au moins trois voies. Elle peut être ou non contrôlée (c'est-à-dire équipée ou non de panneaux de signalisation, de feux de circulation, etc.).

39. Comportement du véhicule soumis à l'essai : le véhicule soumis à l'essai traverse l'intersection tout droit ou en tournant à gauche ou à droite.

40. Comportement de l'autre véhicule : une autre voiture s'approche de la même intersection depuis une autre direction et traverse le carrefour de telle sorte que sa trajectoire croise celle du véhicule soumis à l'essai.

Figure 17

Représentation schématique : véhicule à une intersection



E. Situation inhabituelle

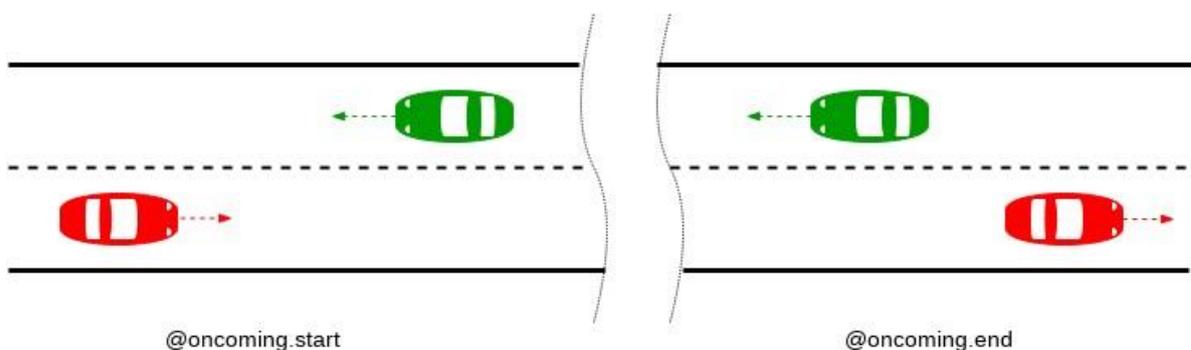
Remarque : Ce scénario peut se produire dans le monde réel. Le soin de décider si ce type de scénario doit être traité revient cependant au groupe compétent.

a) Conducteur à contresens (venant en sens inverse)

41. Dans ce scénario, une voiture roulant en sens inverse s'approche du véhicule soumis à l'essai et le croise.

Figure 18

Représentation schématique : conducteur à contresens



42. Environnement requis : une route à deux voies sur laquelle les véhicules suivent des directions opposées.

43. Comportement du véhicule soumis à l'essai : le véhicule soumis à l'essai circule sur une voie, vraisemblablement à vitesse constante.

44. Comportement de l'autre véhicule : au début du scénario, une autre voiture roule sur l'autre voie et s'approche du véhicule soumis à l'essai. À la fin, l'autre voiture se trouve toujours sur l'autre voie, après avoir croisé le véhicule soumis à l'essai.

VII. Références

1. Règlement ONU n° 157 sur les systèmes automatisés de maintien dans la voie. Consultable en ligne à l'adresse <https://undocs.org/fr/ECE/TRANS/WP.29/2020/81> (version de référence) ou à l'adresse <https://unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-157-automated-lane-keeping-systems-alks>.
2. E. de Gelder, O. Op den Camp, N. de Boer (Pays-Bas), Scenario Categories for the Assessment of Automated Vehicles, version 1.7, 21 janvier 2020.
3. SAFE (Foretellix) Highway and ADAS Traffic Scenario Library, Scenario Definitions at the functional Level, version 1.0, novembre 2020.
4. Japon, Proposal of Traffic Scenarios for Highway Driving (Supplement for presentation), décembre 2020.
5. Chine (CATARC), Proposal about functional scenario from CATARC, décembre 2020.
6. Centre commun de recherche (Commission européenne), Speed profile for car-following tests. Consultable en ligne à l'adresse suivante : [https://wiki.unece.org/download/attachments/92013066/ACSF-25-13_\(EC\)_20190121_TestSpecification_ALKS_JRC.pdf?api=v2](https://wiki.unece.org/download/attachments/92013066/ACSF-25-13_(EC)_20190121_TestSpecification_ALKS_JRC.pdf?api=v2).
7. IGLAD Codebook, Conflict Types, 2019.

Annexe III

Évaluation de crédibilité en vue de l'utilisation d'une chaîne de simulation dans la validation d'un système de conduite automatisé

I. Introduction, objectif et champ d'application

1. Le recours à la modélisation et à la simulation se généralise grâce à l'évolution des capacités de calcul, de la précision, de la facilité d'emploi et de la disponibilité de logiciels adéquats. La modélisation et la simulation peuvent s'avérer bénéfiques pour la validation de la sécurité des systèmes de conduite automatisés, car elles permettent de passer outre certaines limitations imposées aux essais réels et de multiplier les scénarios d'essai. Mais elles peuvent également conduire à des résultats erronés, bien qu'apparemment corrects, en particulier dans le cas de simulations complexes qui ne sont pas appuyées de manière adéquate par des pratiques solides abordant tous les aspects de la modélisation et de la simulation, au-delà de la validation pure et simple. Par conséquent, pour réaliser des essais virtuels à la place ou en conjonction avec d'autres composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai de la conduite automatisée, il convient impérativement de renforcer la confiance dans la crédibilité de la modélisation et de la simulation. Les deux opérations peuvent intervenir dans des essais virtuels si un évaluateur juge leurs résultats suffisamment *crédibles* pour prendre de bonnes décisions, en tenant compte des incertitudes potentielles qui y sont liées.

2. La validation de la modélisation et de la simulation peut être considérée comme la marque de crédibilité de la simulation, malgré certaines insuffisances, notamment la portée restreinte des tests et la difficulté de récupérer les données à l'appui des procédures de validation. Le recours à la modélisation et à la simulation nécessite de porter une plus grande attention à l'ensemble des facteurs influant sur leur qualité et leur validité, afin de :

a) Mettre au point un cadre commun permettant d'établir, de justifier, d'évaluer et de rendre compte de la crédibilité globale de la modélisation et de la simulation ;

b) Préciser les niveaux de confiance à accorder aux résultats de la phase de validation.

3. En parallèle, ce cadre devrait être suffisamment général pour être applicable à divers types de modélisation et de simulation et différentes applications. L'objectif est cependant compliqué par les grandes différences entre les caractéristiques des systèmes de conduite automatisés et la variété des types et applications de modélisation et de simulation. Ces considérations mènent à la mise en place d'un cadre d'évaluation de la crédibilité (fondé sur le risque/éclairé) pertinent et approprié pour toutes les applications de modélisation et de simulation.

4. Le cadre d'évaluation de la crédibilité fournit une description générale des principaux aspects pris en compte pour juger de la crédibilité d'une solution de modélisation et de simulation, accompagnée de principes relatifs au rôle d'évaluateurs tiers⁵ dans le processus de validation en ce qui concerne la crédibilité. Concernant ce dernier point, l'évaluateur devrait étudier la documentation produite pour étayer la crédibilité à la phase d'évaluation, tandis que les essais de validation proprement dits ont lieu lorsque le constructeur a élaboré les systèmes de simulation intégrés.

5. Enfin, le résultat de l'évaluation de la crédibilité actuelle devrait définir l'enveloppe dans laquelle l'outil virtuel peut être utilisé pour soutenir l'évaluation du système de conduite automatisé.

⁵ Dans le cas de l'homologation de type, le constructeur fournit initialement toute la documentation à l'autorité d'homologation pour que celle-ci l'examine et donne son avis. En ce qui concerne l'autocertification, l'évaluateur peut jouer le même rôle dans le cadre de la surveillance du marché.

A. Modèles et gestion de la simulation

8. Le cycle de vie de la modélisation et de la simulation est un processus dynamique comportant souvent de nouvelles distributions qu'il convient de surveiller et de documenter. Des activités de gestion devraient être établies afin d'étayer la modélisation et la simulation à la manière de la gestion du produit d'un travail. Des informations pertinentes sur les aspects suivants devraient être fournies.

1. Processus de gestion de la modélisation et de la simulation

9. Ce processus devrait :

- a) Décrire les modifications entre les distributions ;
- b) Préciser le logiciel correspondant (par exemple, produit logiciel spécifique et version) et l'agencement matériel (par exemple, configuration XiL) ;
- c) Enregistrer les processus de révision internes qui ont accepté les nouvelles distributions ;
- d) Être soutenu pendant toute la durée d'utilisation du modèle virtuel.

2. Gestion des distributions

10. Toute version d'une chaîne d'outils de modélisation et simulation utilisée pour diffuser des données aux fins de la certification devrait être conservée. Les modèles virtuels constituant la chaîne d'outils d'essai devraient être documentés en termes de méthodes de validation correspondantes et de seuils d'acceptation afin d'étayer la crédibilité d'ensemble de la chaîne d'outils. Le développeur devrait appliquer une méthode permettant de tracer les données générées et de les relier à la version correspondante de la modélisation et de la simulation.

11. Contrôle de qualité des données virtuelles. L'exhaustivité, l'exactitude et la cohérence des données devraient être garanties tout au long des distributions et de la durée de vie d'une chaîne d'outils de modélisation et de simulation, afin d'étayer les procédures de vérification et de validation.

3. Expérience et expertise de l'équipe

12. Même si l'expérience et l'expertise sont déjà couvertes dans un sens général au sein de l'organisation, il est important d'établir la confiance dans l'expérience et l'expertise propres aux activités de modélisation et simulation.

13. La crédibilité de la modélisation et de la simulation dépend non seulement de la qualité des modèles de simulation, mais également de l'expérience et de l'expertise du personnel intervenant dans la validation et le déroulement de la modélisation et de la simulation. Par exemple, une bonne compréhension des limitations et du domaine de validation évitera une utilisation éventuellement à mauvais escient de la modélisation et de la simulation ou une mauvaise interprétation de leurs résultats.

14. D'où l'importance d'établir la base de la confiance du constructeur du système de conduite automatisé dans l'expérience et l'expertise :

- a) des équipes qui valideront la chaîne d'outils de simulation ;
- b) des équipes qui utiliseront la simulation validée pour l'exécution d'essais virtuels aux fins de la validation du système de conduite automatisé.

15. Une gestion correcte de l'expérience et l'expertise de l'équipe accroît le niveau de confiance en ce qui concerne la crédibilité de la modélisation et de la simulation et de leurs résultats en garantissant que les facteurs humains derrière la modélisation et la simulation sont pris en considération et que tout risque à composante humaine éventuel est contrôlé, ainsi que l'on peut s'y attendre dans tout système de gestion approprié.

16. Si la chaîne d'outils du constructeur de système de conduite automatisé intègre ou s'appuie sur des apports d'organisations ou des produits extérieurs à la propre équipe du

constructeur, ce dernier fournira une explication des mesures qu'il a prises pour étayer sa confiance dans la qualité et l'intégrité de ces apports.

17. L'expérience et l'expertise de l'équipe comprennent deux niveaux :

a) *Niveau organisationnel*

18. La crédibilité est établie en mettant en place des processus et des procédures visant à recenser et à maintenir les compétences, les connaissances et l'expérience nécessaires pour accomplir des activités de modélisation et simulation. Les processus suivants devraient être établis, maintenus et documentés :

a) Les processus visant à recenser et évaluer la compétence et les aptitudes de l'individu ;

b) Les processus visant à former un personnel compétent à l'exercice des tâches relatives à la modélisation et la simulation.

b) *Niveau de l'équipe*

19. Une fois qu'une modélisation et une simulation ont été finalisées, leur crédibilité est principalement dictée par les compétences et les connaissances de la personne/de l'équipe qui validera la chaîne d'outils de modélisation et simulation et l'utilisera pour la validation du système de conduite automatisé. La crédibilité est établie par la documentation attestant que ces équipes ont reçu la formation adéquate pour remplir leurs missions.

20. Le constructeur du système de conduite automatisé devrait alors :

a) Indiquer sur quoi il fonde sa confiance dans l'expérience et l'expertise de la personne/l'équipe qui valide la chaîne d'outils de modélisation et de simulation ;

b) Indiquer sur quoi il fonde sa confiance dans l'expérience et l'expertise de la personne/l'équipe qui utilise la simulation pour mener l'essai virtuel afin de valider le système de conduite automatisé.

21. La démonstration du constructeur de système de conduite automatisé de la façon dont il applique les principes d'ISO 9001 ou de bonnes pratiques ou normes similaires afin de garantir la compétence de son organisation de modélisation et simulation et des personnes qui la composent constituera la base de cette détermination. L'évaluateur ne peut pas substituer son jugement sur l'expérience et l'expertise de l'organisation ou de ses membres à celle du constructeur.

4. **Pedigree données/entrée**

22. Le pedigree données/entrée contient un enregistrement de traçabilité des données du constructeur du système de conduite automatisé utilisées pour la validation de la modélisation et de la simulation.

a) *Description des données utilisées pour la modélisation et la simulation*

a) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait documenter les données utilisées pour valider le modèle et noter les caractéristiques de qualité importantes ;

b) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir une documentation montrant que les données utilisées pour valider les modèles couvrent les fonctionnalités prévues que la chaîne d'outils doit virtualiser ;

c) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait documenter les procédures de calibrage utilisées pour faire correspondre les paramètres des modèles virtuels avec les données d'entrée collectées.

- b) *Effet de la qualité des données (par exemple, couverture des données, ratio signal/bruit et incertitude/biais/fréquence d'échantillonnage des capteurs) sur l'incertitude des paramètres du modèle*

23. La qualité des données utilisées pour élaborer le modèle affectera l'estimation et le calibrage des paramètres du modèle. L'incertitude dans les paramètres du modèle sera un autre aspect important dans l'analyse de l'incertitude finale.

5. Pedigree données/sortie

24. Le pedigree données/sortie contient un enregistrement de la sélection de signaux que la modélisation et la simulation permettent d'examiner.

- a) *Description des données générées par la modélisation et la simulation*

a) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir [des informations] sur les données et les scénarios utilisés pour la validation de la chaîne d'outils de l'essai virtuel ;

b) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait documenter les données exportées et noter les caractéristiques de qualité importantes, en utilisant par exemple les méthodes de corrélation définies à l'annexe II ;

c) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait tracer une sortie de modélisation et simulation correspondant à la configuration de simulation.

- i) Effet de la qualité des données sur la crédibilité de la modélisation et de la simulation

a) Les données de sortie de la modélisation et de la simulation devraient être suffisamment vastes pour permettre l'exécution correcte des calculs de validation. Les données devraient refléter de manière adéquate le domaine de conception fonctionnelle pertinent pour l'évaluation virtuelle du système de conduite automatisé ;

b) Les données de sortie devraient permettre d'effectuer un contrôle de cohérence/plausibilité des modèles virtuels en exploitant éventuellement des informations redondantes.

- ii) Gestion des modèles stochastiques

a) Les modèles stochastiques devraient être caractérisés du point de vue de leur variance ;

b) Les modèles stochastiques devraient garantir la possibilité de réexécution déterministe.

B. Analyse et description de la modélisation et de la simulation

25. L'analyse et la description de la modélisation et de la simulation visent à les définir dans leur ensemble et à identifier l'espace des paramètres qui peut être évalué via l'essai virtuel. Elles définissent la portée et les limitations des modèles et de la chaîne d'outils, ainsi que les sources d'incertitude qui peuvent affecter ses résultats.

1. Description générale

a) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir une description de l'ensemble de la chaîne d'outils ainsi que de la façon dont les données de la simulation seront utilisées pour étayer la stratégie de validation du système de conduite automatisé ;

b) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir une description claire de l'objectif de l'essai.

2. Hypothèses, limitations connues et sources d'incertitude

a) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait justifier les hypothèses de modélisation qui ont guidé la conception de la chaîne d'outils de modélisation et de simulation ;

b) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir des éléments de preuve concernant :

i) La façon dont les hypothèses définies par le constructeur jouent un rôle dans la définition des limitations de la chaîne d'outils ;

ii) Le niveau de fidélité requis pour les modèles de simulation.

c) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir des justificatifs prouvant que la tolérance pour la corrélation simulation-réel est acceptable pour l'objectif de l'essai ;

d) Enfin, cette section devrait comprendre des informations sur les sources d'incertitude dans le modèle. Cela représentera un apport important pour l'analyse finale de l'incertitude, qui définira comment les sorties du modèle peuvent être affectées par les différentes sources d'incertitude du modèle utilisé.

3. Champ d'application (à quoi sert le modèle ?) Il détermine comment la modélisation et la simulation sont utilisées dans la validation du système de conduite automatisé.

a) La crédibilité de l'outil virtuel devrait être assurée par un champ d'application clairement défini pour les modèles développés ;

b) La modélisation et la simulation parvenues à maturation devraient permettre une virtualisation des phénomènes physiques à un degré de précision qui correspond au niveau de fidélité requis pour la certification. Ainsi, la modélisation et la simulation serviront de « terrain d'épreuve virtuel » pour tester le système de conduite automatisé ;

c) Les modèles de simulation nécessitent des scénarios et des mesures conçus pour la validation. La sélection de scénarios utilisés pour la validation devrait être suffisante, de sorte que la chaîne d'outils fonctionne de la même manière dans des scénarios extérieurs au champ d'application de la validation ;

d) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir une liste de scénarios de validation accompagnée des limitations des paramètres correspondants ;

e) L'analyse du domaine de conception fonctionnelle est un apport crucial pour dériver les exigences, le champ d'application et les effets que la modélisation et la simulation doivent prendre en considération pour étayer la validation du système de conduite automatisé ;

f) Les paramètres générés par les scénarios définiront des données extrinsèques et intrinsèques pour la chaîne d'outils et les modèles de simulation.

4. Évaluation de la criticité

26. Les modèles de simulation et les outils de simulation utilisés dans l'ensemble de la chaîne d'outils devraient être étudiés afin de déterminer leur responsabilité dans le cas d'une erreur affectant la sécurité dans le produit final. L'approche proposée pour l'analyse de la criticité est dérivée de la norme ISO 26262, qui requiert une qualification pour certains des outils utilisés dans le processus de développement. Afin de dériver le degré de criticité des données simulées, l'évaluation de la criticité doit prendre en compte les paramètres suivants :

a) Les conséquences pour la sécurité des personnes, par exemple les classes de gravité dans la norme ISO 26262 ;

b) Le degré auquel les résultats simulés influencent le système de conduite automatisé.

27. Le tableau ci-dessous présente un exemple de matrice d'évaluation de la criticité illustrant cette analyse. Les constructeurs de systèmes de conduite automatisés peuvent adapter cette matrice à leur usage particulier.

Tableau 1
Matrice d'évaluation de la criticité

Incidence sur le système de conduite automatisé	Importante	N/D	Fonctionnement en mode dégradé en respectant les contraintes du système réduit	Création d'un plan de conduite légal et sans collision	Exécution et mise en œuvre correcte du plan de conduite
	Modérée		Détermination de l'emplacement	Prévision du comportement futur d'autres acteurs	Perception des objets statiques et dynamiques pertinents à proximité du système de conduite automatisé
	Mineure	Contrôle stratégique du système de conduite automatisé par l'utilisateur	Communication et interaction avec les autres usagers de la route	Gestion sûre des transitions de contrôle	Détermination de l'atteinte des performances nominales spécifiées
	Négligeable	Interaction de l'utilisateur avec l'interface	Communication de l'état de fonctionnement à l'utilisateur	N/D	
		Négligeable	Mineure	Modérée	Importante
		Conséquence de la décision			

28. Dans la perspective de l'évaluation de la criticité, trois cas sont envisageables pour l'évaluation :

- a) Les modèles ou outils dans les cases rouges sont clairement des candidats pour suivre entièrement l'évaluation de la crédibilité ;
- b) Les modèles ou outils des cases jaunes peuvent être ou non des candidats pour suivre entièrement l'évaluation de la crédibilité à la discrétion de l'évaluateur ;
- c) Les modèles ou outils des cases vertes ne doivent pas suivre l'évaluation de la crédibilité.

C. Vérification

29. La vérification d'une modélisation et d'une simulation implique l'analyse de la mise en œuvre correcte des modèles conceptuels/mathématiques en s'appuyant sur la chaîne d'outils de modélisation et simulation. La vérification contribue à la crédibilité de la modélisation et de la simulation en apportant l'assurance qu'elles ne présenteront pas un comportement irréaliste pour un ensemble de commandes qui ne peuvent pas être testées. La procédure est basée sur une approche à plusieurs étapes comprenant la vérification du code, la vérification du calcul et l'analyse de la sensibilité.

1. Vérification du code

30. La vérification du code implique des essais démontrant qu'aucun défaut numérique/logique n'affecte les modèles virtuels.

a) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait documenter l'exécution des techniques de vérification de son propre code, par exemple la vérification statique/dynamique du code, une analyse de convergence et une comparaison avec des solutions exactes, le cas échéant⁶ ;

b) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir une documentation montrant que l'exploration dans le domaine des paramètres d'entrée a été suffisamment vaste pour identifier la combinaison de paramètres pour laquelle la modélisation et la simulation présentent un comportement instable ou irréaliste. Des mesures de couverture de la combinaison de paramètres peuvent être utilisées pour démontrer l'exploration requise des comportements des modèles ;

c) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait adopter des procédures de contrôle de vraisemblance/cohérence chaque fois que les données le permettent.

2. Vérification des calculs

31. La vérification du calcul traite de l'estimation des erreurs numériques affectant la modélisation et la simulation :

a) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait documenter les estimations d'erreurs numériques (par exemple, erreur de discrétisation, erreur d'arrondi, convergence de procédures itératives) ;

b) Les erreurs numériques devraient être maintenues suffisamment confinées pour ne pas affecter la validation.

3. Analyse de sensibilité

32. L'analyse de sensibilité vise à quantifier la façon dont les valeurs de sortie du modèle sont affectées par des changements dans les valeurs d'entrée du modèle et donc à identifier les paramètres ayant le plus grand impact sur les résultats du modèle de simulation. L'étude de sensibilité aide également à déterminer le degré auquel le modèle de simulation satisfait aux seuils de validation lorsqu'il est soumis à de légères variations des paramètres. Elle est donc fondamentale pour étayer la crédibilité des résultats de la simulation.

a) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir une documentation démontrant que les paramètres les plus critiques influençant le résultat de la simulation ont été identifiés au moyen de techniques d'analyse de la sensibilité, notamment en appliquant une perturbation des paramètres du modèle ;

b) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait démontrer que des procédures de calibrage robustes ont été adoptées pour identifier et calibrer les paramètres les plus critiques afin d'accroître la crédibilité de la chaîne d'outils élaborée ;

c) Enfin, les résultats de l'analyse de sensibilité serviront également à définir les entrées et paramètres dont la caractérisation de l'incertitude nécessite une attention particulière afin de définir correctement l'incertitude des résultats de la simulation.

4. Validation

33. Le processus quantitatif consistant à déterminer le degré auquel un modèle ou une simulation est une représentation exacte du monde réel dans la perspective des usages prévus de la modélisation et de la simulation nécessite la sélection et la définition de plusieurs

⁶ Roy, C. J. (2005). Review of code and solution verification procedures for computational simulation. *Journal of Computational Physics*, vol. 205 (1), p. 131 à 156.

éléments. Des exemples de validation de la chaîne d'outils virtuels sont présentés à l'appendice 3 de l'annexe III du présent document.

a) *Indicateurs de performance*

a) Les indicateurs de performance sont des indicateurs qui servent à comparer les résultats des essais virtuels aux résultats des essais en conditions réelles. Ils sont définis pendant l'analyse de la modélisation et de la simulation ;

b) Les indicateurs de validation peuvent inclure :

- i) l'analyse de valeur discrète, par exemple la rapidité de détection, la rapidité d'allumage ;
- ii) l'évolution dans le temps, par exemple les positions, les vitesses, l'accélération ;
- iii) l'analyse basée sur le flux d'actions, par exemple des calculs distance/vitesse, le calcul du temps restant avant collision, l'enclenchement du freinage.

b) *Mesures d'ajustement*

a) Les cadres analytiques sont utilisés pour comparer le monde réel et les indicateurs de simulation. Ce sont généralement des indicateurs de performance clés (KPI) indiquant la comparabilité statistique entre deux ensembles de données. Des exemples de mesures d'ajustement et de méthodes de corrélation utilisables au cours du processus de validation sont présentés à l'annexe III – Appendice 2 du présent document.

b) La validation devrait montrer que ces KPI sont corrects.

c) *Méthodologie de validation*

a) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait définir les scénarios logiques utilisés pour la validation de la chaîne d'outils de l'essai virtuel. Ces scénarios devraient couvrir dans toute la mesure du possible le domaine de conception fonctionnelle de l'essai virtuel pour la validation du système de conduite automatisé ;

b) La méthodologie exacte dépend de la structure et de l'objet de la chaîne d'outils. La validation peut porter sur un ou plusieurs des éléments suivants :

- i) Des modèles de sous-systèmes : par exemple un modèle d'environnement (réseau routier, conditions météorologiques, interaction des usagers de la route), des modèles de capteur (détection électromagnétique et mesure de la distance (RADAR), détection et localisation par la lumière (LiDAR), caméra), un modèle de véhicule (direction, freinage, groupe motopropulseur) ;
- ii) Le système du véhicule (modèle de la dynamique du véhicule accompagné du modèle de l'environnement) ;
- iii) Le système du capteur (modèle de capteur accompagné du modèle de l'environnement) ;
- iv) Le système intégré (modèle du capteur + modèle de l'environnement avec les influences du modèle du véhicule).

d) *Exigence de précision*

34. L'exigence concernant le seuil de corrélation est définie pendant l'analyse de la modélisation et de la simulation. La validation devrait démontrer que les KPI sont corrects, par exemple en utilisant les méthodes de corrélation définies à l'annexe II.

e) *Portée de la validation (la partie de la chaîne d'outils à valider)*

35. Une chaîne d'outils se compose de multiples outils et chaque outil utilisera un certain nombre de modèles. La portée de la validation comprend tous les outils et les modèles pertinents soumis à la validation.

f) *Résultats de la validation interne*

a) La documentation devrait non seulement apporter la preuve de la validation du modèle de simulation, mais également servir à obtenir des informations suffisantes sur les processus et produits qui garantissent la crédibilité globale de la chaîne d'outils utilisée ;

b) La documentation/les résultats peuvent être reportés d'évaluations antérieures de la crédibilité.

g) *Validation indépendante des résultats*

36. L'évaluateur devrait vérifier la documentation fournie par le constructeur et peut mener des essais physiques de l'outil intégré dans son ensemble. Si les résultats des essais virtuels ne correspondent pas suffisamment à ceux des essais physiques, le constructeur ou l'évaluateur peut demander que les essais virtuels ou physiques, ou les deux, soient refaits. Dans ce cas, les résultats sont examinés par l'évaluateur et tout écart doit être justifié par le constructeur de façon satisfaisante.

h) *Caractérisation de l'incertitude*

37. Cette section traite de la caractérisation de la variabilité attendue des résultats de la chaîne d'outils virtuelle. L'évaluation devrait comprendre deux phases. Dans la première, les informations collectées dans la section de l'analyse et de la description de la modélisation et de la simulation et dans celle du pedigree données/entrée sont utilisées pour caractériser l'incertitude dans les données d'entrée, dans les paramètres du modèle et dans la structure de modélisation. Ensuite, en propageant toutes les incertitudes à travers la chaîne d'outils virtuelle, l'incertitude dans les résultats du modèle est quantifiée. En fonction de l'incertitude dans les résultats du modèle, des marges de sécurité adéquates devront être introduites par le constructeur du système de conduite automatisé dans l'utilisation de l'essai virtuel pour la validation de ce système.

i) *Caractérisation de l'incertitude dans les données d'entrée*

38. Le constructeur du système de conduite automatisé devrait démontrer qu'il a correctement estimé les entrées du modèle critique au moyen de techniques robustes telles que des répétitions multiples pour l'évaluation de la quantité.

ii) *Caractérisation de l'incertitude dans les paramètres du modèle (à la suite d'un calibrage)*

39. Le constructeur du système de conduite automatisé devrait démontrer que les paramètres critiques du modèle qui ne peuvent pas être estimés de façon identique sont caractérisés au moyen d'une distribution et/ou d'intervalles de confiance.

iii) *Caractérisation de l'incertitude dans la structure de modélisation et de simulation*

40. Le constructeur du système de conduite automatisé devrait apporter la preuve que les hypothèses de modélisation se voient attribuer une caractérisation quantitative de l'incertitude générée (par exemple, en comparant la sortie de différentes approches de la modélisation chaque fois que possible).

iv) *Caractérisation de l'incertitude aléatoire ou épistémique*

41. Le constructeur du système de conduite automatisé devrait viser à établir une distinction entre la composante aléatoire de l'incertitude (qui peut seulement être estimée, mais pas réduite) et l'incertitude épistémique découlant du manque de connaissance dans la virtualisation du processus.

III. Structure de la documentation

42. Cette section définit la façon dont les informations ci-dessus seront collectées et organisées dans la documentation remise par le constructeur du système de conduite automatisé à l'autorité compétente :

a) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait produire un document (un « manuel de simulation ») structuré conformément à la présente description pour fournir les justificatifs concernant les sujets présentés ;

b) La documentation devrait être remise en même temps que la distribution correspondante de la modélisation et de la simulation et des données produites la concernant ;

c) Le constructeur du système de conduite automatisé devrait fournir des références claires qui permettent de relier la documentation aux données/à la modélisation et à la simulation correspondantes ;

d) La documentation devrait être conservée pendant le cycle de vie entier de l'utilisation de la modélisation et de la simulation. L'évaluateur peut auditer le constructeur du système de conduite automatisé en jugeant sa documentation et/ou en menant des essais physiques.

IV. Interdépendances avec les sous-groupes 1 et 3 du groupe VMAD

43. Les scénarios développés par les sous-groupes du groupe de travail informel des méthodes de validation pour la conduite automatisée sont la base de la chaîne d'outils de modélisation et de simulation.

44. L'analyse de crédibilité peut être exploitée pour étayer les procédures d'audit du secteur établies dans le sous-groupe 3 du groupe VMAD.

Annexe III – Appendice 1

Exemple de chaîne d’outils pour essais virtuels

Les essais virtuels permettent d’alléger la charge imposée par des essais physiques et de démontrer les performances du système de conduite automatisé sur le plan opérationnel. Cela dit, aucun outil de simulation unique n’est en mesure de tester tous les aspects du logiciel du système de conduite automatisé, d’où la nécessité pour les constructeurs de tirer parti des spécificités de divers outils de simulation pour renforcer la confiance dans la sécurité de l’ensemble du système.

Chaque outil d’essai virtuel a des avantages et des inconvénients, en fonction de la vitesse et du coût d’exécution et du niveau de fidélité atteint. En règle générale, les outils les moins fidèles sont mis en œuvre pour couvrir un grand nombre de scénarios et obtenir ainsi une compréhension générale de la performance des systèmes. Ensuite, il est possible de rehausser le niveau de fidélité dans un sous-ensemble de scénarios afin de valider les performances du système de conduite automatisé dans un nombre statistiquement pertinent de scénarios réalistes. La chaîne d’outils pour essais virtuels d’un constructeur peut être composée des éléments suivants :

I. Simulation de perception

1. La simulation de la perception sert à entraîner et valider les algorithmes de perception du logiciel du système de conduite automatisé avec des modèles de capteurs physiques précis en combinaison avec des données terrain. Elle peut être réalisée en boucle ouverte puisque les algorithmes de planification et de contrôle sont contournés.

Figure 1

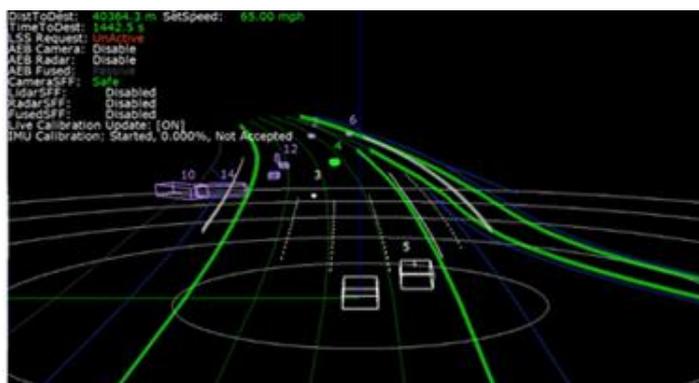
Exemple de simulation de perception



II. Simulation de planification et de contrôle

2. La simulation de la planification et du contrôle est utilisable pour valider les algorithmes de contrôle du logiciel du système de conduite automatisé avec des modèles de capteurs basiques. Cette opération peut être réalisée plus rapidement qu’en temps réel et s’avère un moyen efficace de tester le système de contrôle dans un grand nombre de scénarios.

Figure 2
Exemple de simulation de planification et de contrôle



III. Simulation de la pile logicielle et matérielle complète des véhicules automatisés (MIL, SIL ou HIL)

3. La simulation de la pile logicielle et matérielle complète permet de restituer avec précision des flux de données de capteurs représentant un large éventail d'environnements et de scénarios. Le logiciel du système de conduite automatisé traite les informations simulées comme si elles provenaient des capteurs d'un véhicule circulant réellement sur route et y réagit en envoyant les commandes d'activation au simulateur. Les ingénieurs peuvent ainsi procéder à des essais dans des conditions inhabituelles, telles que des tempêtes de pluie ou de neige, ou une forte luminosité à différentes heures du jour et de la nuit. Chaque scénario peut être testé à de multiples reprises, en ajustant de nombreuses variables telles que le revêtement de la chaussée et son environnement, les conditions météorologiques, les autres véhicules et l'heure de la journée.

4. La simulation HIL permet de tester l'ensemble du composant matériel ou de l'unité de contrôle moteur (ECU) avant que le véhicule réel ne soit disponible, ainsi que les interactions/réseaux des composants d'un prototype virtuel, par exemple une défaillance électrique ou électronique (E/E) des composants matériels.

Figure 3
Exemple de simulation de la pile logicielle et matérielle complète



IV. La simulation avec véhicule dans la boucle (VIL)

5. La simulation VIL fournit un environnement de validation pour les véhicules prêts à rouler, combiné à une simulation d'environnement virtuel. Elle permet d'exécuter des scénarios complexes et critiques pour la sécurité au niveau du véhicule.

A. Simulation VIL sur banc d'essai

6. La simulation VIL sur banc d'essai combine ces avantages avec ceux d'un laboratoire et est axée sur la flexibilité dans la génération de scénarios et sur la reproductibilité de leur exécution. Elle permet en outre de tester les capteurs réels et la perception dans la boucle.

Figure 4

Exemple de simulation VIL sur banc d'essai



7. La simulation VIL sur banc d'essai peut porter sur les éléments suivants :

a) La dynamique longitudinale : la dynamique longitudinale est émulée par le banc d'essai. Il peut s'agir d'un banc dynamométrique ou de moyeu de roue/de groupe motopulseur. Un dynamomètre haute dynamique combiné à une simulation de la dynamique du véhicule permet d'exécuter des manœuvres et scénarios divers, notamment des manœuvres à haute dynamique poussées jusqu'aux limites (patinage réaliste des roues, etc.) ;

b) La dynamique latérale : concernant la dynamique latérale, y compris la direction, les bancs d'essai peuvent être complétés par des dispositifs additionnels permettant d'agir sur le pilotage. Idéalement, l'action sur la direction est non seulement autorisée, mais les forces de réaction qui en résultent sont émulées de manière appropriée afin d'éviter les états d'erreur et d'assurer un comportement adéquat ;

c) L'interface de simulation de l'environnement virtuel : selon le cas d'utilisation et les exigences, différentes possibilités sont envisageables : intégration de listes d'objets (pas de capteur, pas de perception dans la boucle), injection de données brutes (pas de capteur, mais perception dans la boucle), stimulation du capteur à distance (capteur et perception dans la boucle). Grâce à la stimulation à distance, aucune modification du véhicule n'est requise. De plus, un usage mixte est possible.

B. Simulation VIL sur terrain d'expérimentation

8. La simulation VIL sur terrain d'expérimentation est davantage axée sur l'interaction entre le conducteur/passager et le véhicule. Dans cette configuration, l'accélération réelle (longitudinale et latérale) du véhicule peut être ressentie par le conducteur/passager (contrairement à un véhicule dans la boucle sur banc d'essai). Le jugement et l'évaluation par le conducteur réel sont possibles.

9. La simulation VIL sur terrain d'expérimentation peut se composer des éléments suivants :

a) La dynamique longitudinale : les éléments de dynamique longitudinale réelle sont disponibles ;

b) La dynamique latérale : les éléments de dynamique latérale réelle sont disponibles ;

c) L'interface de simulation de l'environnement virtuel : généralement, l'interface entre le véhicule et l'environnement virtuel est réalisée par intégration de listes d'objets. L'injection de données brutes est également possible. Par contre, les capteurs réels ne peuvent être pris en compte (à quelques exceptions près pour des capteurs très simples comme les ultrasons).

V. La simulation avec conducteur dans la boucle (DIL)

10. Les essais virtuels DIL permettent d'appuyer l'évaluation de cette catégorie de prescriptions fonctionnelles en analysant l'interaction entre le conducteur et le système de conduite automatisé dans un environnement sûr et contrôlé.

Figure 5

Exemple de simulation avec conducteur dans la boucle

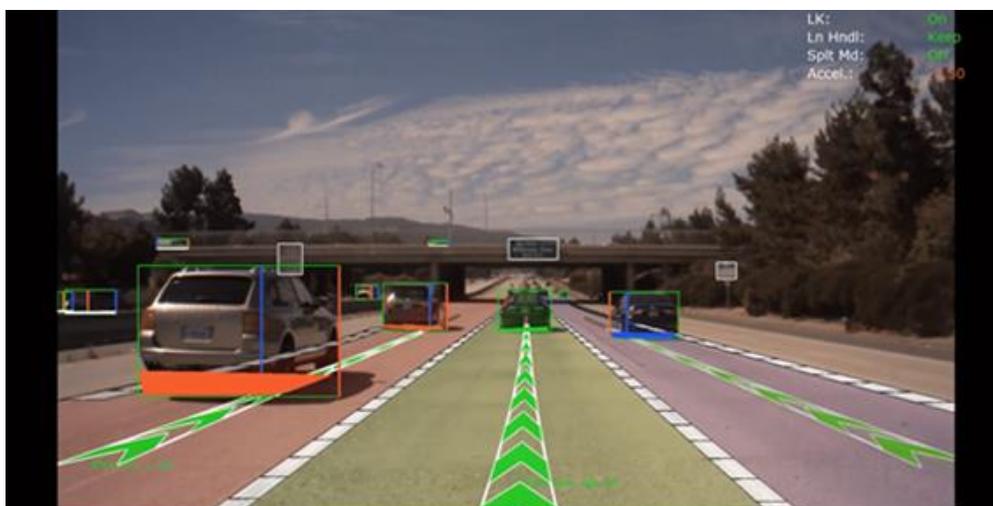


VI. Retraitement logiciel

11. Le retraitement logiciel consiste à renvoyer au logiciel du système de conduite automatisé des données de capteurs précédemment enregistrées, plutôt que des données synthétiques, ce qui permet d'évaluer avec précision la performance de la perception dans un système en boucle ouverte.

Figure 6

Exemple d'essai par retraitement logiciel



12. Au vu des catégories de prescriptions de sécurité actuellement envisagées, ces essais semblent particulièrement pertinents dans les cas suivants :

a) Les systèmes de conduite automatisés devraient conduire en toute sécurité et gérer correctement les situations critiques. Les essais virtuels peuvent jouer un rôle prépondérant à cet égard. Il est possible de recourir à des simulations MIL/SIL, HIL ou VIL pour évaluer la conformité à ces prescriptions à différents stades du processus de vérification et de validation du véhicule ;

b) Les systèmes de conduite automatisés devraient interagir en toute sécurité avec le conducteur. Les simulations DIL peuvent contribuer à évaluer la conformité à ces prescriptions en analysant l'interaction entre le conducteur et le système de conduite automatisé dans un environnement sûr et contrôlé ;

c) Les systèmes de conduite automatisés devraient gérer en toute sécurité les modes de défaillance et garantir un état de fonctionnement sûr. Le recours aux essais virtuels pour évaluer la conformité à ces prescriptions est également très prometteur, mais nécessite probablement des recherches supplémentaires. Les simulations SIL pourraient inclure des pannes simulées et des demandes de maintenance. Les simulations HIL et VIL pourraient être utilisées pour évaluer la manière dont le système réagit à un dysfonctionnement réel.

Tableau 1

Essais virtuels visant à évaluer les prescriptions fonctionnelles

<i>Prescriptions fonctionnelles</i>	<i>SIL</i>	<i>HIL</i>	<i>VIL</i>	<i>DIL</i>	<i>Retraitement logiciel</i>
Le système de conduite automatisé devrait conduire en toute sécurité	Oui	Oui	Oui	–	Oui
Le système de conduite automatisé devrait interagir en toute sécurité avec l'utilisateur	Oui	Oui	Oui	Oui	–
Le système de conduite automatisé devrait gérer les situations critiques sur le plan de la sécurité	Oui	Oui	Oui	–	Oui
Le système de conduite automatisé devrait gérer en toute sécurité les modes de défaillance	Oui	Oui	Oui	–	–

13. Le tableau ci-dessous décrit tous les environnements d'essai disponibles, qui se distinguent les uns des autres par l'application de stimuli virtuels et réels et par les éléments testés.

Tableau 2

Outils d'essai virtuel et environnements d'essai disponibles

<i>Outil d'essai virtuel</i>	<i>Logiciel</i>	<i>Matériel</i>	<i>Véhicule</i>	<i>Conducteur</i>	<i>Environnement</i>
Perception	Réel	Virtuel	Virtuel	Virtuel	Virtuel
Planification et contrôle	Réel	Virtuel	Virtuel	Virtuel	Virtuel

<i>Outil d'essai virtuel</i>	<i>Logiciel</i>	<i>Matériel</i>	<i>Véhicule</i>	<i>Conducteur</i>	<i>Environnement</i>
Pile logicielle et matérielle complète des véhicules automatisés (logiciel dans la boucle – SIL)	Réel	Virtuel	Virtuel	Virtuel	Virtuel
Pile logicielle et matérielle complète des véhicules automatisés (matériel dans la boucle – HIL)	Réel	Réel	Virtuel	Virtuel	Virtuel
Véhicule dans la boucle	Réel	Réel	Réel	Virtuel	Virtuel
Conducteur dans la boucle	Virtuel	Virtuel	Virtuel	Réel	Virtuel
Retraitement logiciel	Réel	Virtuel	Aucun	Aucun	Réel
Terrain d'expérimentation	Réel	Réel	Réel	Réel	Aucun
Essai en conditions réelles	Réel	Réel	Réel	Réel	Réel

Annexe III – Appendice 2

Exemple de méthodes de corrélation

La validation d'une chaîne d'outils d'essais virtuels doit reposer sur l'évaluation quantitative d'un ensemble d'indicateurs clés de performance (KPI) au regard des données réelles. L'évaluation renvoie une mesure de corrélation qui est ensuite comparée à un seuil de corrélation prescrit. À l'évidence, aucune méthode de corrélation des données de simulation et des données réelles n'est adaptée à l'ensemble des outils d'essais virtuels ; c'est donc au constructeur du système de conduite automatisé qu'il incombe de démontrer le bien-fondé des méthodes de corrélation choisies.

Le calcul de la corrélation consiste à comparer des séries chronologiques ou des distributions de probabilités, en fonction des données disponibles, et la configuration de l'essai virtuel. Les environnements d'essai virtuels déterministes tels que MIL et SIL produiront des résultats déterministes, sans possibilité d'évaluer les intervalles de confiance. De même, les essais en conditions réelles, qui reposent sur une exécution unique de chaque test, ne permettent pas d'évaluer les intervalles de confiance. Ainsi, lorsqu'un environnement d'essai MIL est comparé à une exécution unique à des fins de validation, la seule analyse envisageable est la comparaison de séries chronologiques.

D'autre part, un environnement d'essai HIL ou VIL est soumis à un certain degré de stochasticité, impliquant que les répétitions multiples produiront une distribution statistique des résultats. Un résultat analogue est obtenu avec l'exécution de plusieurs répétitions pour un scénario de terrain d'expérimentation donné. Cette façon de procéder permet de réaliser des tests statistiques sur les distributions de données collectées.

I. Comparaison graphique

1. Les comparaisons graphiques constituent une première étape de validation démontrant la qualité du modèle de simulation. Mais la subjectivité inhérente à la nature qualitative de l'évaluation fait que les comparaisons graphiques ne sont appropriées que pour étayer la crédibilité de la chaîne d'outils développée. Une méthodologie de validation correcte doit être basée sur les méthodes quantitatives décrites ci-dessous.

II. Comparaison de données scalaires

2. Les comparaisons de données scalaires servent à mettre en regard les valeurs significatives d'un signal. Lorsque seules les valeurs maximales sont pertinentes (par exemple, la vitesse angulaire de lacet maximale pendant une manœuvre d'urgence d'évitement d'obstacles) aux fins de la validation, le critère d'erreur relative (REC) [1] de la différence d'amplitude est une mesure appropriée :

$$\frac{|peak_{real} - peak_{sim}|}{peak_{real}} * 100.$$

III. Comparaison de séries chronologiques

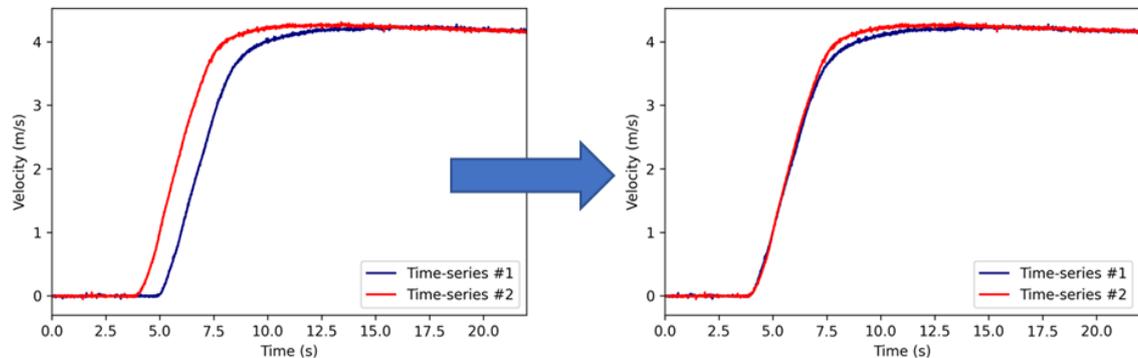
3. Les données scalaires constituent la première étape de l'évaluation quantitative, mais elles ne fournissent que des informations limitées sur la concordance des signaux. L'analyse des séries chronologiques permet de mieux cerner la corrélation entre les données générées par la simulation et les données réelles.

4. Plusieurs outils sont à même de quantifier la distance entre les séries chronologiques. Avant toute tentative de comparaison, les séries chronologiques doivent être synchronisées et rééchantillonnées sur la base de la fréquence la plus basse entre les données réelles et les données simulées. Une méthode généralement employée pour cette synchronisation consiste à

partir du critère de l'heure d'arrivée, ce qui implique de fixer une heure de départ de référence pour les signaux, dérivée de la première fois où le signal a atteint une amplitude prédéfinie.

Figure 1

Exemple de synchronisation et de rééchantillonnage de séries chronologiques



5. Lorsque la synchronisation et le rééchantillonnage ont été effectués, les séries chronologiques peuvent être analysées à l'aide d'une fonction de distance. L'estimation de la distance est généralement réalisée en appliquant une fonction norme au vecteur des résidus. Par exemple, la norme L_2 (distance euclidienne) se lit comme suit :

$$\sqrt{\sum_i^N (y_{sim,i} - y_{real,i})^2},$$

où N est la liste totale des échantillons. Le calcul de la norme L_2 sur le nombre total d'échantillons permet d'obtenir l'erreur quadratique moyenne :

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (y_{sim,i} - y_{real,i})^2}.$$

6. D'autres normes sont utilisables pour quantifier les écarts entre les séries chronologiques, avec des caractéristiques ou des signaux d'erreur différents. Ainsi, la norme L_∞ renvoie la valeur absolue maximale de l'erreur :

$$\max_i (|y_{sim,i} - y_{real,i}|).$$

7. Des métriques récemment développées permettent de distinguer la contribution de l'erreur de phase (donc la forme de la série chronologique) de la contribution de l'erreur d'amplitude entre les signaux, fournissant ainsi davantage d'informations sur les éventuelles incohérences qui affectent le modèle. Un rapport publié récemment par Sandia [2] détaille ces techniques et présente notamment la métrique de Sprague et Geers [3]. Ce même critère est adopté pour valider les modèles virtuels de sièges dans le secteur de l'aviation [4]. La métrique est basée sur l'établissement de la distance intégrale entre les signaux

$$d_M = \sqrt{\frac{\sum_i^N y_{sim,i}^2}{\sum_i^N y_{real,i}^2} - 1},$$

et la différence de phase,

$$d_P = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\sum_i^N y_{sim,i} * y_{pg,i}}{\sqrt{\sum_i^N y_{sim,i}^2 * \sum_i^N y_{real,i}^2}} \right)$$

les deux étant combinées en erreur totale.

$$d_{SG} = \sqrt{d_M^2 + d_P^2}.$$

8. Une autre analyse envisageable consiste à établir la corrélation entre les signaux. Plusieurs outils de calcul de corrélation ont été proposés dans la littérature [5]. Parmi eux, la corrélation de Pearson est un outil couramment adopté :

$$r_{sim,real} = \frac{|\sum_{i=1}^N (y_{sim,i} - \bar{y}_{sim})(y_{real,i} - \bar{y}_{real})|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{sim,i} - \bar{y}_{sim})^2 \sum_{i=1}^m (y_{real,i} - \bar{y}_{real})^2}}.$$

Des valeurs de $r_{sim,real}$ proches de 1 suggèrent une bonne concordance entre les signaux, alors que la corrélation se dégrade à l'approche de 0.

IV. Tests statistiques

9. Les tests statistiques visent à vérifier si l'hypothèse nulle, à savoir « le modèle est une représentation exacte des phénomènes du monde réel », ne peut pas être rejetée compte tenu des preuves générées par la simulation. Ils sont particulièrement utiles lorsqu'il s'agit d'environnements d'essai virtuels non déterministes ou d'itérations multiples du même scénario de conduite sur le terrain d'essai.

10. Un des tests statistiques courants est le fameux test T, qui analyse l'écart entre les moyennes de deux distributions. Il peut être réalisé sur des ensembles de données à un ou deux échantillons. Une étude à un échantillon consiste à déterminer si la moyenne d'une population (\bar{x}) est statistiquement différente d'une moyenne de référence donnée μ_0 . La valeur t est calculée comme suit :

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu_0)\sqrt{N}}{s},$$

où S est l'écart-type de l'échantillon. On peut rejeter l'hypothèse nulle si la valeur t dépasse la valeur critique résultant de la taille de l'échantillon N et du niveau de signification.

11. Un exemple typique de test T à un échantillon est la recherche d'un écart significatif entre la moyenne expérimentale d'une quantité et la distribution de la même quantité obtenue à partir de plusieurs itérations dans une configuration HIL/VIL. De même, la comparaison de répétitions multiples sur un terrain d'expérimentation avec les éléments tirés d'un environnement déterministe donne lieu à un test à un seul échantillon. Le test T à deux échantillons permet de comparer deux distributions. Si la comparaison doit porter sur un plus grand nombre de distributions, il conviendra d'exploiter l'analyse de variance.

12. Alors que le test T vise principalement à étudier la moyenne des distributions, d'autres tests ne formulent pas d'hypothèses sur la normalité des données d'entrée. À titre d'exemple, le test de Kolmogorov-Smirnov évalue la distance verticale maximale entre les fonctions de distribution cumulative (CDF) des distributions d'entrée.

Annexe III – Appendice 3

Exemples de validation

Cette section présente les approches de modélisation et de validation pour trois catégories de modèles : les modèles voie et caméra, les RADAR et LiDAR, et les modèles dynamiques de véhicules. Les deux premiers paragraphes traiteront de la mise au point de modules de perception virtuelle qui, avec les modèles de véhicules virtuels décrits dans le dernier paragraphe, permettent d'interfacer le système de conduite automatisé avec l'environnement de simulation. Dans cette annexe figurent également des exemples de mesures et d'indicateurs de performance clés pertinents capables de déterminer le niveau de fidélité restitué par la solution virtuelle.

La présente discussion porte sur les modèles de simulation en tant que tels (leurs propriétés intrinsèques). Néanmoins, une évaluation complète du niveau de fidélité assuré par la chaîne intégrée d'outils d'essais virtuels pourrait également inclure l'étude du réalisme offert par l'environnement virtuel au niveau des capteurs, en l'occurrence l'aptitude du moteur de simulation à restituer fidèlement les caractéristiques pertinentes du monde réel pour les systèmes de perception qui ne correspondent pas nécessairement aux caractéristiques de la vision humaine.

I. Validation du modèle de voie

1. La validation du modèle de voie est considérée comme un exemple pratique de la manière dont la validation est effectuée dans le cadre de l'évaluation de la crédibilité. Une représentation précise des modèles de voies est indispensable à l'algorithme de perception mis en œuvre dans la plupart des systèmes d'assistance latérale, par exemple l'assistance au maintien dans la voie, au centrage dans la voie, au changement de voie, etc. Pour établir que les modèles de voies sont adaptés à l'objectif, nous avons utilisé les processus définis dans l'évaluation de la crédibilité. La dynamique du véhicule n'y est pas prise en compte, car la dynamique du châssis n'aura qu'un impact négligeable sur la capacité de détection du marquage de voies. Le processus comprend les éléments suivants :

- a) Un sous-système – le modèle de caméra ;
- b) Un système de capteurs – le modèle de caméra avec le marquage virtuel des voies ;
- c) Un système intégré – les algorithmes de détection des voies de circulation.

A. Validation du modèle de caméra

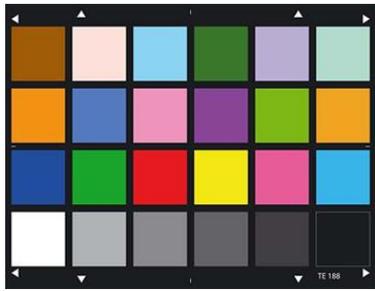
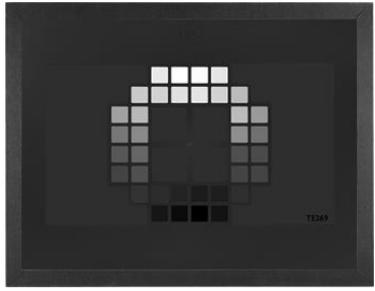
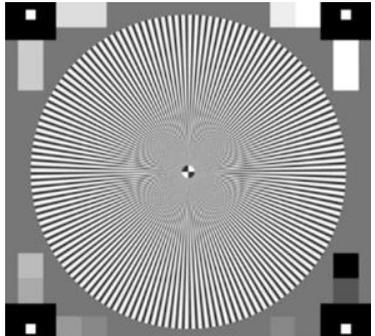
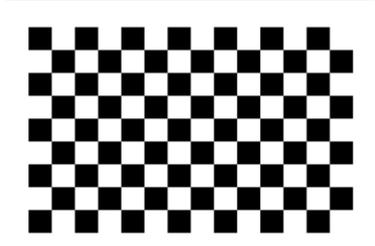
2. La simulation doit fournir une image précise (propriété intrinsèque) de la position exacte (propriété extrinsèque) pour toutes les caméras d'une scène donnée. Des phénomènes intrinsèques spécifiques liés à la caméra sont à prendre en compte lors de la validation, notamment :

- a) La distorsion d'objectif : aberration optique due à la projection ;
- b) L'effet vignette : assombrissement du bord de l'écran ;
- c) L'instabilité du grain : introduction de bruit blanc ;
- d) L'effet Bloom : présence de franges autour des zones lumineuses ;
- e) L'exposition automatique : adaptation du gamma de l'image aux zones plus sombres ou plus claires ;
- f) Les facteurs de flare : réflexion d'objets lumineux sur la lentille ;
- g) La profondeur de champ : flou des objets proches ou très éloignés de la caméra ;
- h) Temps d'exposition : durée d'ouverture de l'obturateur.

3. Une liste non exhaustive d'outils pouvant être utilisés pour étayer la validation du modèle de caméra est présentée ci-dessous :

Tableau 1

Exemples d'outils pouvant être utilisés pour étayer la validation du modèle de caméra

<i>Outil</i>	<i>Image</i>	<i>Finalité</i>
Test de mire colorimétrique Macbeth		<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer l'espace colorimétrique de la caméra • Déterminer les paramètres de modélisation du bruit de la caméra • En savoir plus sur les caractéristiques de l'exposition
Tests de mire OECF		<ul style="list-style-type: none"> • Conçu pour évaluer la fonction de conversion opto-électronique d'une caméra
Mire SFR		<ul style="list-style-type: none"> • Mesurer la netteté, le contraste et les effets de lentille
Caractérisation du flare		<ul style="list-style-type: none"> • Différencier les composants statiques et dynamiques (bruit de grenaille) en vue du recodage de la vidéo • Déterminer les caractéristiques de l'objectif s'agissant des aberrations optiques de type facteurs de flare et les artefacts fantômes
Étalonnage FTheta		<ul style="list-style-type: none"> • À chaque position, incline la cible du damier horizontalement et verticalement jusqu'à 45 degrés • Déterminer le polynôme FTheta et le comparer à une mesure plus précise de la lentille

4. April Tags est un système de balises visuelles facilitant la validation des propriétés extrinsèques en lien avec une caméra. Les balises sont un moyen d'identification et de positionnement en 3D, même dans des conditions de faible visibilité. Elles agissent comme des codes-barres, stockant une petite quantité d'informations (ID de la balise), tout en permettant une estimation simple et précise de la position de la balise en 6D (x, y, z, roulis, tangage, lacet).

Tableau 2
Caméra frontale large, 120° de champ de vision

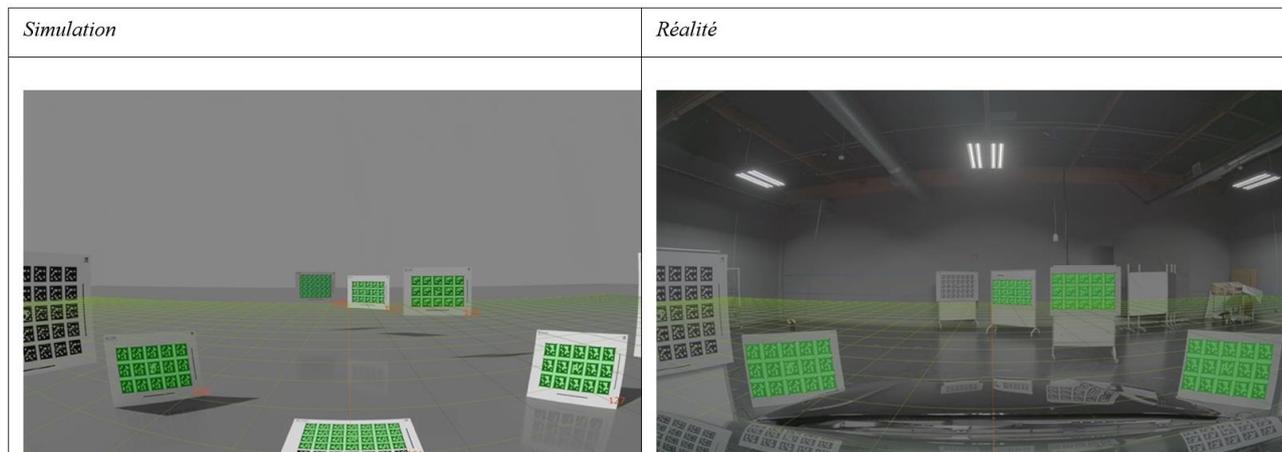
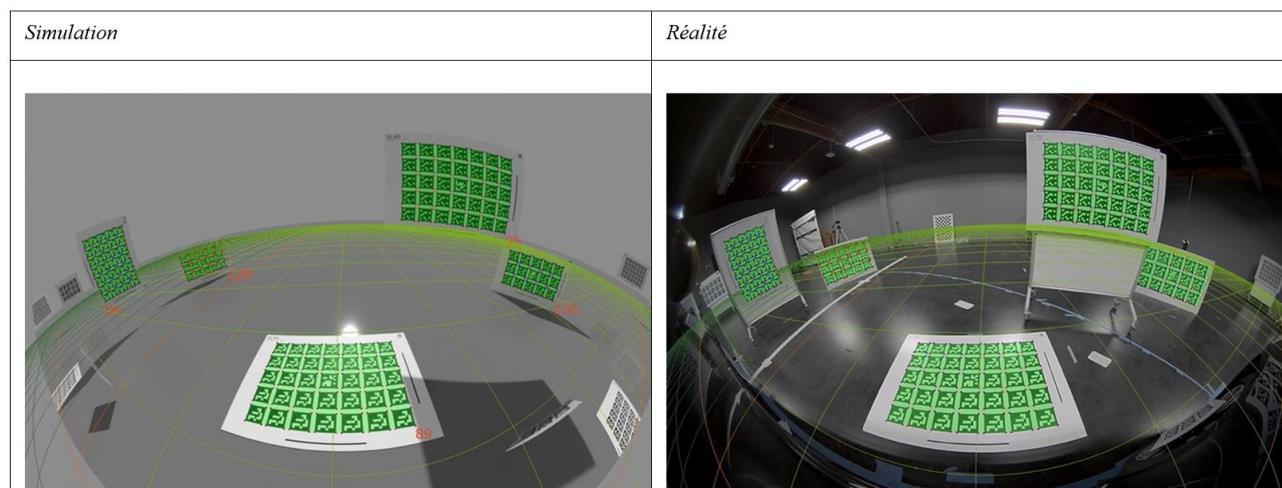


Tableau 3
Caméra œil de poisson gauche, 200° de champ de vision



5. Les positions et orientations des balises April sont contraintes dans la scène et visibles à partir de plusieurs caméras. Les seuils peuvent être fixés pour l'erreur dérivée de l'écart entre la position absolue et l'angle des balises April.

Figure 1
Exemple d'erreur de position absolue à la suite d'un étalonnage

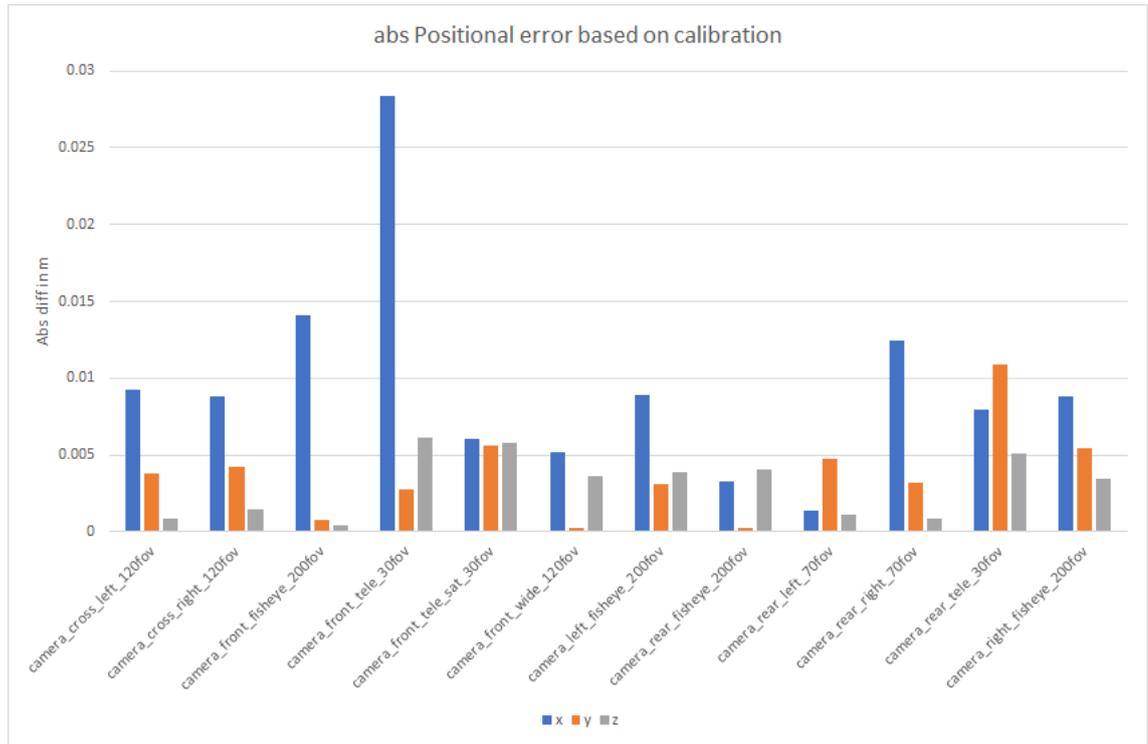
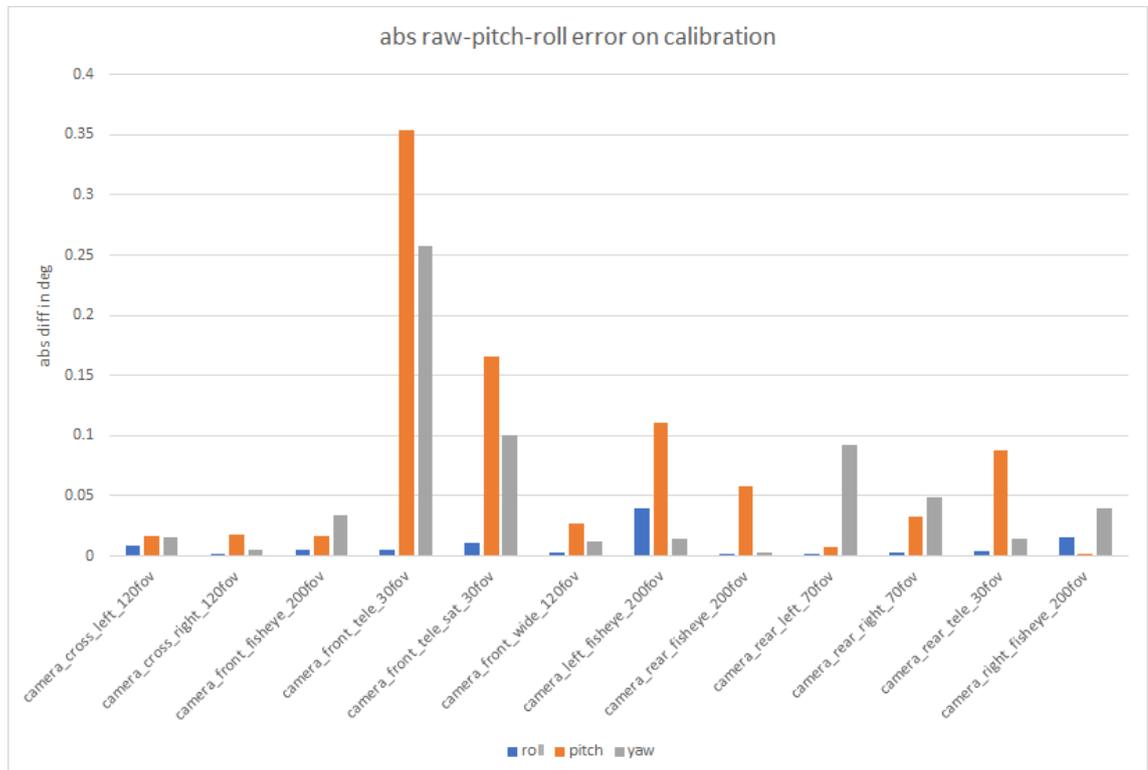


Figure 2
Exemple d'erreur absolue pour le lacet, le tangage et le roulis à la suite d'un étalonnage



B. Validation du système de capteurs

6. L'objectif de la validation du système de capteurs est de démontrer que les modèles de caméras donnent des résultats précis au sein de l'environnement virtuel dans lequel le système en test sera utilisé. Des indicateurs de performance clés (KPI) prédéfinis sont utilisables pour déterminer la performance du système de capteurs virtuels. Pour les modèles de voies, le ratio de contraste entre les marquages et la surface de la chaussée permet de démontrer les performances du système de capteurs dans des environnements physique et virtuel.

7. Un cadre simple permettant de classer les performances des capteurs en plusieurs catégories d'équivalence est présenté ici à titre d'exemple. La méthode repose sur des classes d'équivalence pour les conditions ayant une incidence significative sur la mesure de performance d'un capteur, dans ce cas, le rapport contraste/luminosité entre le marquage de la voie et la surface de la chaussée. Il est possible de créer un schéma de prescription combinant le niveau de performance atteint et certaines conditions liées à l'environnement ou propres au scénario.

8. Un schéma générique de prescription est définissable comme suit :

Le {KPI} doit être {supérieur à} {seuil de KPI} si {les conditions sont remplies}.

9. Le schéma peut être repris avec des conditions différentes, selon les besoins, afin de 1) couvrir entièrement toutes les conditions externes, y compris les extrêmes, et 2) fixer des valeurs limites pour lesquelles les exigences de performance sont modifiables en fonction des conditions, par exemple en assouplissant le taux de détection des faux positifs de la limite de voie en cas de chute de neige. Si ce schéma de prescription est bien établi pour l'ensemble des conditions possibles, s'il est vérifié de manière indépendante et si les développeurs s'engagent à le respecter, le problème des « insuffisances fonctionnelles » dans les performances du capteur sera probablement réduit, voire éliminé.

10. Une méthode de détermination des classes peut par exemple obéir à cette structure simple :

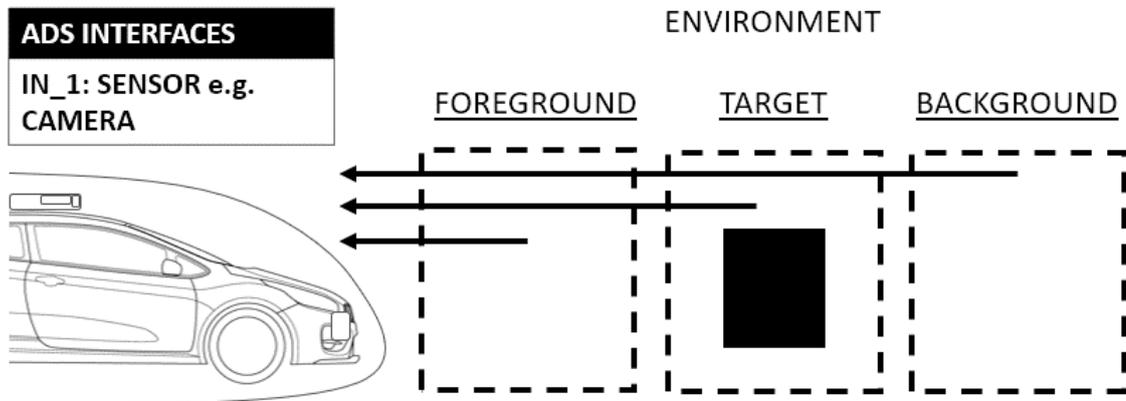
a) Classe 1 : Conditions nominales – Il s'agit des conditions idéales et optimales ;

b) Classe 2 : Conditions moyennes – Il s'agit des conditions attendues dans le monde réel qui nécessiteront probablement un effort de développement important par rapport aux conditions de la classe 1, par exemple la fourchette du quartile intérieur ;

c) Classe 3 : Pires conditions acceptables – Il s'agit des pires conditions dans lesquelles un certain niveau de performance sera garanti, par exemple la fourchette du 95^e percentile. Elles nécessitent probablement un arbitrage entre le niveau de performance minimal requis et l'effort de développement restant. Au-delà de cette classe, aucune exigence de performance n'est imposée. Une adaptation est possible le cas échéant.

11. Enfin, il sera peut-être nécessaire de scinder les conditions elles-mêmes sur la base de paramètres, en fonction de leur dépendance les unes par rapport aux autres, afin de constituer un ensemble minimal de paramètres capable de rendre compte de manière adéquate des conditions environnementales et des conditions propres à chaque scénario. Pour toutes les modalités de détection envisagée jusqu'à présent, à savoir caméra (lumière visible), RADAR, LiDAR, caméra à ultrasons et caméra infrarouge, le modèle de capteur générique suivant s'est avéré reproductible et utile dans l'analyse de toutes les conditions environnementales pour tous les modes de détection. Il est scindé en trois paramètres distincts : Premier plan, Cible et Arrière-plan.

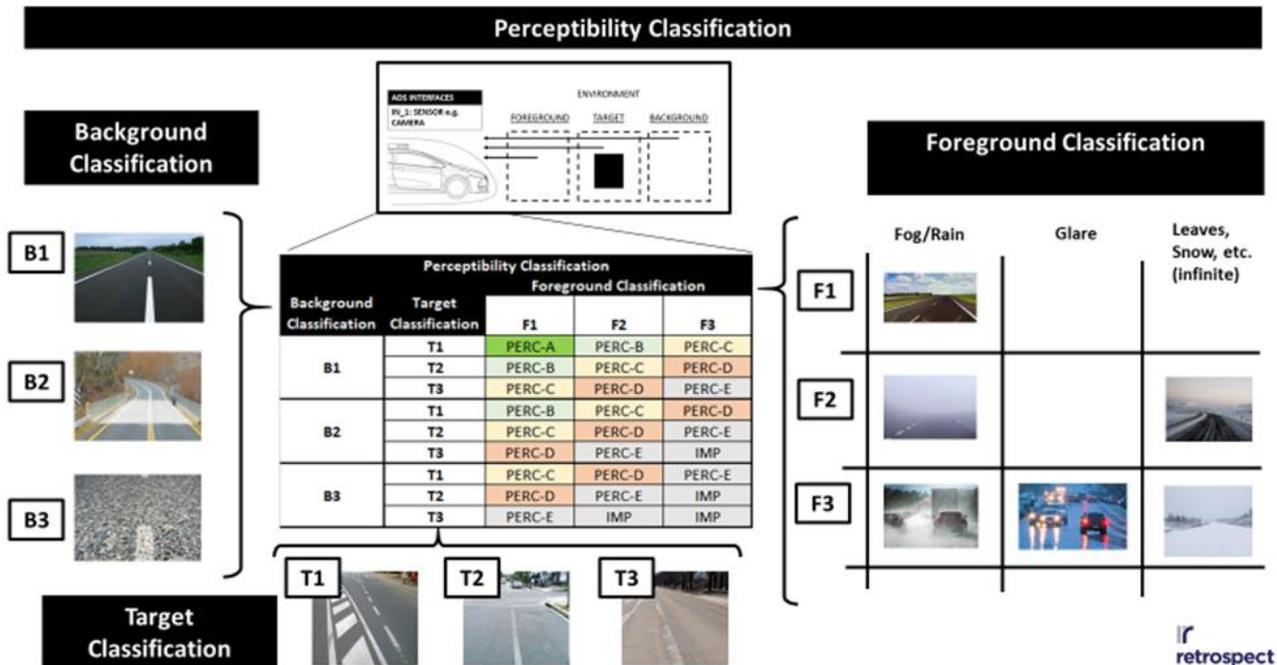
Figure 3
Modèle de capteur générique pour l'analyse de toutes les conditions environnementales dans tous les modes de détection



12. Dans l'exemple d'un système à caméra chargé de détecter la voie de circulation, la chaussée constituera la « cible ». Il peut être nécessaire de développer de nombreux attributs pour saisir pleinement tous les aspects requis de cette cible, dont la couleur, la position, la courbure, le type de marquage, la netteté (ou le flou), etc. Dans ce cas précis, l'attribut intéressant est le rapport de contraste entre le marquage de la voie de circulation et la surface de la chaussée. Cette surface de la chaussée formera « l'arrière-plan » dans le modèle de détection, et le « premier plan » pourra être n'importe quoi situé entre le capteur et la cible, par exemple du brouillard, de la pluie ou de l'air limpide, ou encore des débris, des objets, des accumulations de neige, etc.

13. Dans la figure suivante, une image provenant d'une démonstration de réalité augmentée au niveau du capteur est utilisée pour illustrer comment le premier plan, dans ce cas la neige, peut modifier la valeur de contraste entre le marquage de la voie de circulation (cible) et la chaussée (arrière-plan). Cet exemple souligne l'utilité de la classification, qui peut fournir un point d'interface cohérent entre les variations et combinaisons infinies des conditions environnementales et l'ensemble fini des prescriptions de performance que les développeurs doivent s'engager à respecter.

Figure 5
Classification de la perceptibilité



16. Il appartient aux concepteurs de déterminer les éléments présentant un intérêt pour les objectifs globaux du système et les capacités techniques spécifiées. Cette approche de validation des systèmes de capteurs vise à montrer comment les concepteurs et les testeurs spécifient les prescriptions de performance et de sécurité dans leurs contrats de développement et à démontrer le respect de ces contrats. Elle permet d'éviter de découvrir, à un stade avancé du développement, que les performances attendues ne sont pas réalisables. Et si une telle situation venait à se produire, la solution la plus simple consistera probablement à renégocier les niveaux de performance et à en informer toutes les parties prenantes. Le risque majeur serait de ne pas rédiger des prescriptions et d'opter pour une approche « attentiste » s'agissant des performances des capteurs.

C. Validation du système intégré

17. Pour finir, le système intégré au complet est testé. Cette phase inclut le système de capteurs avec les algorithmes de perception intégrés. Les données simulées et réelles sont collectées dans le même environnement et synchronisées. Les algorithmes de perception des changements d'état sont ensuite comparés pour vérifier la correspondance entre les résultats simulés et les performances réelles. Le seuil de corrélation détermine l'utilisation des algorithmes de détection des voies pour prendre en charge le système d'avertissement de franchissement de ligne, le système d'aide au maintien dans la voie ou du système de conduite automatisé.

Tableau 4
Collecte et synchronisation des données de simulation et des données en conditions réelles



18. Après démonstration de la précision adéquate du modèle de voie, l’outil d’essai virtuel peut intervenir pour étayer l’évaluation des algorithmes de détection de la voie. Les essais virtuels permettent d’accélérer grandement le processus de validation et fournissent suffisamment d’éléments factuels attestant du bon fonctionnement du système dans l’ensemble du domaine de conception fonctionnelle. Lorsque la corrélation de base des modèles et de la chaîne d’outils est établie, l’outil d’essai virtuel peut intervenir pour valider un vaste éventail de comportements et confirmer la sécurité des réactions à des situations inattendues. En appliquant des variations et une randomisation des différentes entrées, la réponse du système est testée à travers une large palette de scénarios et de stimuli, permettant ainsi de renforcer la confiance en ses performances. Cette confiance peut être corroborée par des métriques de couverture (mesurées à partir des données d’entrée et/ou des domaines de conception fonctionnelle), une couverture plus élevée étant corrélée à une plus grande confiance dans la performance du système, puisque testée sur un ensemble plus large de situations.

Figure 6
Essai virtuel du comportement et des réactions du système dans divers scénarios



II. Validation des modèles LiDAR/RADAR

A. Approches de modélisation

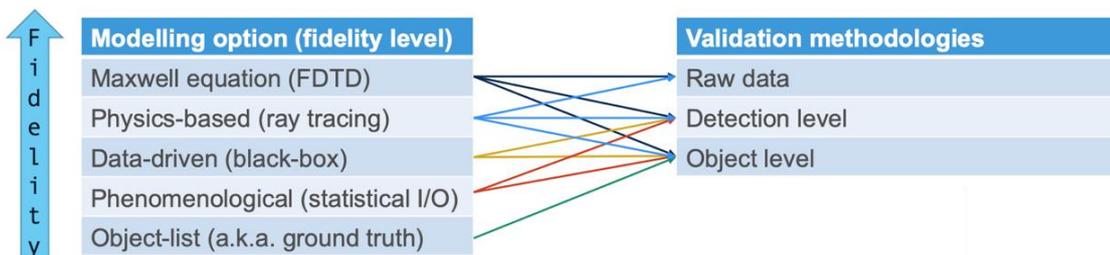
19. Les approches de modélisation LiDAR (Light Detection and Ranging/détection et localisation par la lumière)/RADAR (radio detection and ranging/détection électromagnétique et mesure de la distance) peuvent être subdivisées en plusieurs niveaux de fidélité selon l'application cible de la modélisation et de la simulation. Trois classes de référence [6] peuvent ainsi être dégagées :

a) Modèles à faible fidélité : ils récupèrent la liste et l'état des objets de trafic directement à partir de la réalité de terrain de l'environnement virtuel. Ce paradigme de modélisation ne tient pas compte des aspects statistiques liés à la perception, tels que le taux de faux positifs/négatifs. Ces modèles peuvent toutefois inclure une modélisation basique du capteur, pour prendre par exemple en compte le champ de vision du capteur et les occlusions pour filtrer la liste complète des objets ;

b) Modèle à moyenne fidélité : à l'instar des modèles à faible fidélité, les modèles à moyenne fidélité récupèrent l'état des objets à partir du noyau de l'environnement virtuel. Néanmoins, les capteurs à fidélité moyenne introduisent une probabilité de détection (faux positifs et faux négatifs), les incidences de la forme et du matériau des objets sur la détection, et des effets environnementaux tels que la dégradation de l'atmosphère ;

c) Modèle à haute fidélité : il tire parti de techniques de rendu avancées, coûteuses en ressources informatiques, pour modéliser les processus physiques qui se déroulent dans le capteur réel. Les capteurs à haute fidélité acceptent en entrée l'environnement de simulation en rendu 3D, après ray-tracing et tramage. Ces modèles de capteurs sont ensuite capables de fonctionner avec des données d'entrée similaires à celles de leurs homologues physiques.

Figure 7
Niveaux de fidélité pour les options de modélisation LiDAR et RADAR
et méthodes de validation correspondantes



20. Chaque niveau de fidélité peut être associé à une procédure de validation adaptée. Par exemple, seuls les niveaux de fidélité « haute » et « moyenne » fournissent des données brutes simulées comparables au monde réel. En revanche, un modèle à faible fidélité ne transmettra que des informations relatives au niveau détection/objet. Par conséquent, toute procédure de validation nécessitant en entrée des données brutes sera inenvisageable.

B. Mesures et indicateurs clés de performance pour la validation explicite des modèles LiDAR/RADAR

21. La validation d'un modèle de capteur vise à établir si le modèle développé est une solution viable aux fins de la certification d'un système de conduite automatisé au moyen d'essais virtuels. Les techniques de validation « explicite » comparent les résultats directs du modèle virtuel à ceux du modèle réel pour le même ensemble de données d'entrée, lorsque c'est possible.

22. La validation du système de conduite automatisé s'appuie sur les approches de modélisation les plus fidèles avec des essais virtuels où le système de perception joue un rôle

déterminant. C'est pourquoi l'annexe s'attache principalement à la validation des modèles LiDAR/RADAR de fidélité moyenne et haute. Ces modèles sont généralement validés par l'exploitation des « nuages de points » générés ou au niveau de la « grille d'occupation ».

23. Les grilles d'occupation sont dérivées des nuages de points où une cellule (c_i) est censée être libre ($c_i = 0$) ou occupée ($c_i = 1$) si la probabilité de détecter un obstacle dans la cellule est supérieure à 0,5.

24. Les grilles d'occupation dérivées des tests de simulation et des essais en conditions réelles peuvent être comparées à l'aide des méthodes suivantes :

a) Perte par pixel :

$$\frac{\sum_{x_c=0}^{\text{Width}} \sum_{y_c=0}^{\text{height}} | \text{sim}_{\text{grid}}(x_c, y_c) - \text{real}_{\text{grid}}(x_c, y_c) |}{\sum_{x_c=0}^{\text{Width}} \sum_{y_c=0}^{\text{height}} | \text{sim}_{\text{grid}}(x_c, y_c) - \text{real}_{\text{grid}}(x_c, y_c) |} ;$$

b) Corrélation de Pearson :

$$\frac{|\sum_{i=1}^{n_c} (c_{i,\text{sim}} - \bar{c}_{\text{sim}})(c_{i,\text{real}} - \bar{c}_{\text{real}})|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_c} (c_{i,\text{sim}} - \bar{c}_{\text{sim}})^2 \sum_{i=1}^{n_c} (c_{i,\text{real}} - \bar{c}_{\text{real}})^2}} ; \frac{|\sum_{i=1}^{n_c} (c_{i,\text{sim}} - \bar{c}_{\text{sim}})(c_{i,\text{real}} - \bar{c}_{\text{real}})|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_c} (c_{i,\text{sim}} - \bar{c}_{\text{sim}})^2 \sum_{i=1}^{n_c} (c_{i,\text{real}} - \bar{c}_{\text{real}})^2}}$$

c) Ratio de grille d'occupation :

$$\frac{\sum_i^N \text{cell sim } c_j}{\sum_j^N \text{cell real } c_i} \frac{c_j}{\sum_j^N \text{cell real } c_i} ;$$

25. Une autre procédure de validation consiste à caractériser les nuages de points virtuels et réels à l'aide d'une fonction de distance, par exemple :

a) La distance euclidienne :

$$D'_{pp} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \min_{1 \leq n \leq N} \|p_{\text{sim}} - p_{\text{real}}\| ; D'_{pp} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \min_{1 \leq n \leq N} \|p_{\text{sim}} - p_{\text{real}}\|$$

b) La corrélation de Pearson :

$$\frac{|\sum_{i=1}^m (x_{i,j} - \bar{x}_j)(y_i - \bar{y})|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{i,j} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} ; \frac{|\sum_{i=1}^m (x_{i,j} - \bar{x}_j)(y_i - \bar{y})|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{i,j} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}}$$

26. Sur la base des éléments fournis dans [7] et [8], les seuils de corrélation suivants ont été évoqués dans la littérature :

Tableau 5
Seuils de corrélation dans la littérature

Métrique	Corrélation dans la littérature	Optimum
Corrélation de Pearson – Grille d'occupation	0,59-0,76	1
Ratio de grille d'occupation	0,2-0,5	1
Corrélation de Pearson – Nuage de points	0,57-0,59	1

C. Validation implicite du modèle LiDAR/RADAR

27. Le système de perception d'un système de conduite automatisé est l'élément qui fait office d'interface entre l'environnement de simulation et le système de conduite automatisé. Ainsi, toute information recueillie par les capteurs est transmise au système de conduite automatisé. La validation d'un modèle de capteur ne doit donc pas négliger l'impact que des écarts, même minimes, entre le modèle réel et le modèle virtuel peuvent avoir sur un système complexe tel que le système de conduite automatisé.

28. Les techniques de validation « implicite » établissent la validité du modèle de capteur en intégrant les algorithmes de perception [9] dans la chaîne de validation. La comparaison permet ensuite d'établir la différence entre les objets de trafic dérivés de la simulation et les objets de circulation détectés/suivis dans le monde réel.

29. L'évaluation des mesures implicites peut être effectuée en comparant directement la distance entre les coordonnées $(x, y)_{obj, sim}$ et $(x, y)_{obj, real}$ des obstacles suivis pendant la durée de l'expérience à l'aide des techniques décrites à l'annexe II. Une autre solution consiste à utiliser la fonction « Intersection sur Union » :

$$J(bb_{sim}, bb_{real}) = \frac{|bb_{sim} \cap bb_{real}|}{|bb_{sim} \cup bb_{real}|}$$

qui peut être calculée lorsque la couche de détection renvoie des boîtes englobantes.

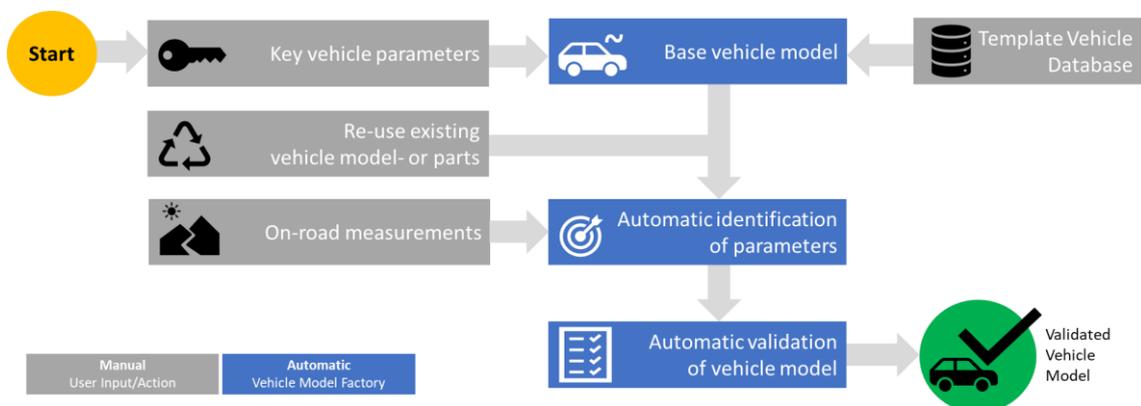
III. Validation du modèle de dynamique du véhicule

30. Outre la simulation de l'environnement et des capteurs, décrite dans les sections précédentes, la simulation de la dynamique du véhicule joue un rôle déterminant dans la chaîne d'outils d'essais virtuels en vue de la certification et de l'homologation. L'élaboration de modèles de dynamique à haute fidélité de véhicules est une activité chronophage et onéreuse, nécessitant des mesures précises des composants (par exemple, le patinage des pneumatiques) pour atteindre la qualité de précision requise au niveau du véhicule.

A. L'approche par atelier de création de prototypes virtuels de véhicules [10]

31. Pour réduire le temps, les efforts et les connaissances préalables nécessaires à l'élaboration et à la validation d'un modèle de véhicule, il est possible d'utiliser des outils logiciels qui guident l'élaboration de modèles à haute fidélité. À titre d'exemple, l'approche par atelier de création de prototypes virtuels de véhicules nécessite trois entrées principales : a) un nombre minimal de paramètres clés du véhicule, récupérables à partir des fiches techniques du véhicule ou des mesures effectuées en atelier (par exemple, poids d'angle du véhicule, empattement, largeur de la voie, dimensions des pneumatiques, etc.) ; b) des données collectées par un ensemble minimal d'appareils de mesure et d'enregistrement (accès au bus de données CAN, unité de mesure inertielle, accéléromètre et GPS) installés dans le véhicule d'essai (l'instrumentation requise ne nécessite aucune modification structurelle du véhicule) ; c) un ensemble de manœuvres prédéfinies doit être effectué sur une piste d'essai.

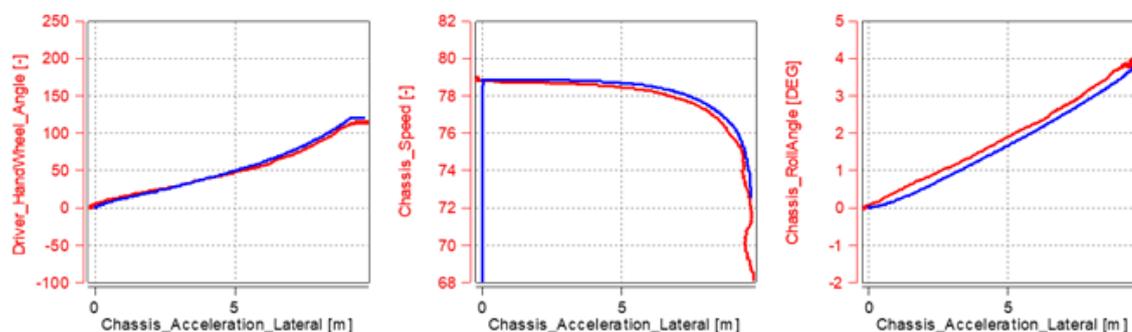
Figure 8
Approche par atelier de création de prototypes virtuels de véhicules



32. Pour la tâche d'identification des paramètres, des groupes sont définis. Par exemple :
- Résistance à l'avancement (coefficients de résistance à l'avancement) ;
 - Répartition des masses (position du centre de gravité à la verticale et à l'horizontale) ;
 - Suspension (comportement dynamique longitudinal et latéral) ;
 - Groupe motopropulseur (cartographies couple/moteur et pédales, rapports de boîte de vitesses et rapports totaux).

Figure 9

Comparaison entre les mesures sur route et les résultats de modélisation de la dynamique du véhicule



Slowly Increased Steer (80kph)	Max. lateral acceleration [m/s ²]	Roll Angle Gradient [deg/(m/s ²)]	Pitch Angle Gradient [deg/(m/s ²)]	
			Acceleration	Braking
Road measurements	9.801	0.348	8.33	8.12
AVL VSM™	9.6	0.332	8.32	8.25
Accuracy	97.9%	95.4%	98.8%	98.3%

33. Le logiciel permet l'identification automatique des paramètres sur la base de l'ensemble des données collectées et du modèle choisi. Une fois les paramètres identifiés, ils sont intégrés au modèle du véhicule et une simulation de validation est effectuée automatiquement.

B. Exemple de simulation de système automatique de freinage d'urgence

34. Pour une certification virtuelle des fonctions d'un système actif d'aide à la conduite (ADAS)/système de conduite automatisé (AD), des modèles dûment validés de dynamique du véhicule sont essentiels pour atteindre une corrélation maximale entre le comportement du système virtuel et celui du système réel. Par exemple, des modèles adéquats de pneumatiques et de freins permettent d'effectuer des essais objectifs de freinage d'urgence automatisé portant sur la décélération et la distance de freinage. Des modèles de suspension validés affecteront de manière réaliste les sorties des capteurs virtuels, tels que le RADAR, le LiDAR ou la caméra, notamment, par exemple, le tangage et le roulis du châssis. En général, une analyse de corrélation dans le cadre de la création d'un jumeau numérique du véhicule pour les essais virtuels du système actif d'aide à la conduite devrait être menée à plusieurs niveaux :

- Le comportement dynamique du véhicule ;
- La géométrie du véhicule (jumeau numérique en 3D) ;
- Les sorties du capteur d'environnement (données brutes) ;

- d) Les sorties de la perception (objets détectés et classés) ;
- e) Le comportement du contrôleur du système actif d'aide à la conduite/système de conduite automatisé.

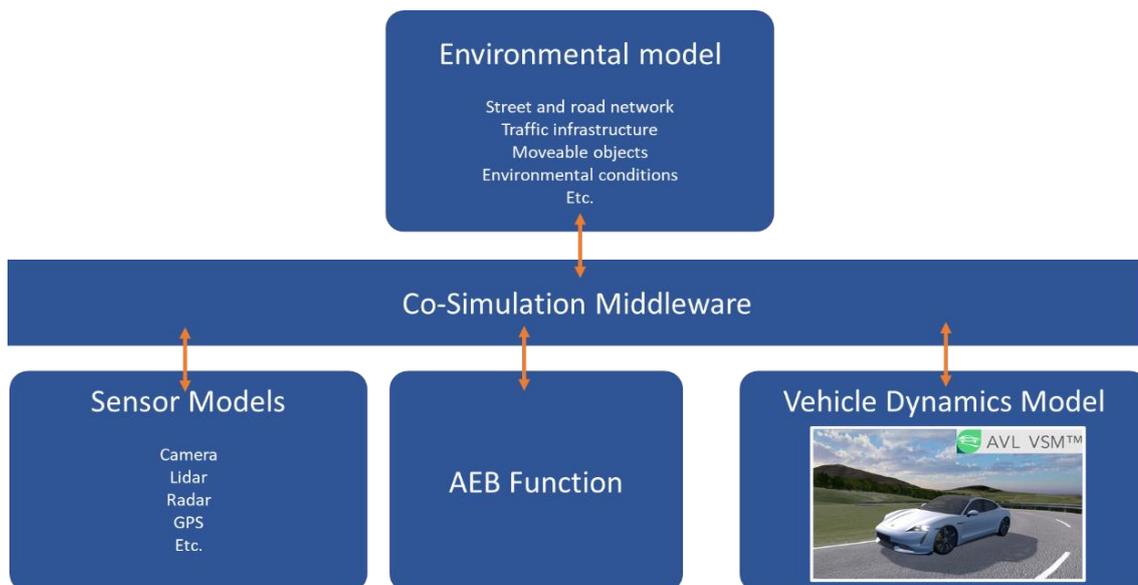
35. Pour démontrer l'importance de modèles fidèles de dynamique du véhicule pour les essais du système actif d'aide à la conduite, la simulation d'une fonction de freinage automatique d'urgence a été réalisée et les résultats de deux configurations virtuelles distinctes d'une limousine ont été analysés. Dans la configuration 1, le véhicule est équipé de pneumatiques « été » ; dans la configuration 2, il est doté de pneumatiques « hiver ».

36. Dans le cadre d'une base de données plus vaste de scénarios relatifs au règlement sur la sécurité générale des véhicules, un scénario simple de freinage automatique d'urgence a été simulé, au cours duquel le véhicule soumis à l'essai s'approche d'un objet cible immobile à des vitesses variables, à savoir 20 km/h, 40 km/h et 60 km/h. Le contrôleur de freinage automatique d'urgence est basé sur des seuils de temps restant avant la collision qui déclenchent les différents modes de freinage. Le freinage d'urgence est activé dès que le temps restant avant collision dépasse le seuil critique.

37. Au total, six simulations ont été réalisées. Trois pour la configuration avec pneumatiques « été », et trois avec des pneumatiques « hiver », à l'adhérence longitudinale réduite. Les résultats montrent qu'avec des pneumatiques « hiver », la distance de freinage est nettement plus longue. À 60 km/h, la distance de freinage passe de 14,77 m à 17,51 m. À 20 km/h, la distance de freinage augmente de 2,2 m avec les pneumatiques « hiver ».

Figure 10

Exemple de validation de système automatique de freinage d'urgence



38. En revanche, la décélération longitudinale maximale diminue lorsque l'on passe des pneumatiques « été » aux pneumatiques « hiver ». Les différents essais font apparaître une diminution comprise entre 0,6 m/s² (pour 20 km/h) et 1,8 m/s² (pour 60 km/h). Bien que ces résultats ne soient pas surprenants et que l'on puisse s'y attendre lors des essais en conditions réelles, les simulations démontrent l'effet de légères variations du modèle sur les performances du système de freinage automatique d'urgence. Dans les simulations utilisant des modèles dynamiques à faible fidélité, cet effet risque d'être négligé et des scénarios ou des collisions critiques ne seront peut-être pas détectés.

IV. Références

1. “proposed_cm-s-014_modelling_simulation_-_for_consultation.pdf”. Document consulté le 30 juillet 2021. [En ligne]. Disponible à l’adresse suivante : https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/proposed_cm-s-014_modelling_simulation_-_for_consultation.pdf.
2. K. A. Maupin et L. P. Swiler, “Validation Metrics for Deterministic and Probabilistic Data”. p. 52.
3. M. A. Sprague et T. L. Geers, “A spectral-element method for modelling cavitation in transient fluid–structure interaction”, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 60, no 15, p. 2467-2499, août 2004, doi: 10.1002/nme.1054.
4. “ARP5765B: Analytical Methods for Aircraft Seat Design and Evaluation – SAE International”, <https://www.sae.org/standards/content/arp5765b/> (document consulté le 29 juillet 2021).
5. J. P. C. Kleijnen, “1999: VALIDATION OF MODELS: STATISTICAL TECHNIQUES AND DATA AVAILABILITY”, p. 8.
6. B. Schlager et al., “State-of-the-Art Sensor Models for Virtual Testing of Advanced Driver Assistance Systems/Autonomous Driving Functions”, vol. 3, no. 3, p. 30, 2020.
7. A. Schaermann, A. Rauch, N. Hirsenkorn, T. Hanke, R. Rasshofer et E. Biebl, “Validation of vehicle environment sensor models”, *Symposium de l’IEEE sur les véhicules intelligents (IV)*, Los Angeles, Californie, Etats-Unis d’Amérique, juin 2017, p. 405-411. doi: 10.1109/IVS.2017.7995752.
8. T. Hanke et al., “Generation and validation of virtual point cloud data for automated driving systems”, *20e Conférence internationale de l’IEEE sur les systèmes de transport intelligents (ITSC)*, Yokohama, octobre 2017, p. 1–6. doi: 10.1109/ITSC.2017.8317864.
9. A. Ngo, M. P. Bauer et M. Resch, “A Multi-Layered Approach for Measuring the Simulation-to-Reality Gap of Radar Perception for Autonomous Driving”, *ArXiv210608372 Cs Eess*, juin 2021. Document consulté le 25 juin 2021. [En ligne]. Disponible à l’adresse suivante : <http://arxiv.org/abs/2106.08372>.
10. M. Oswald, “Vehicle Model Factory - Automatic Generation of Validated Virtual Prototypes”. Document présenté au *Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik*, Wiesbaden, novembre 2021.

Annexe IV

Prescriptions pour l'évaluation du concept de sécurité par conception du système de conduite automatisé

Généralités

L'évaluation du concept de sécurité par conception du système de conduite automatisé a pour objectif de démontrer que le constructeur a bien recensé les dangers et les risques associés à ce système et qu'il a mis en place un concept cohérent de sécurité par conception pour les maîtriser. En outre, il devra confirmer que l'évaluation des risques et le concept de sécurité par conception ont été validés par le constructeur au moyen d'essais établissant, avant la mise sur le marché du véhicule, que celui-ci satisfait aux prescriptions de sécurité et, en particulier, qu'il ne présente pas de risques déraisonnables pour l'écosystème du transport au sens large, notamment pour le conducteur, les passagers et les autres usagers de la route.

I. Description générale du système de conduite automatisé

1. Il convient de fournir un descriptif expliquant de manière simple les caractéristiques de fonctionnement et les fonctionnalités du système de conduite automatisé :
 - a) Domaine de conception opérationnelle (vitesse, type de route, pays, environnement, état des routes, etc.) et les conditions limites ;
 - b) Performances de base (par exemple, détection d'objets et d'événements et réaction (OEDR) etc.) ;
 - c) Interactions avec les autres usagers de la route ;
 - d) Conditions principales concernant les manœuvres à risque minimal ;
 - e) Interactions avec le conducteur (le cas échéant) ;
 - f) Centre de supervision (le cas échéant) ;
 - g) Dispositifs d'activation, de désactivation et de neutralisation du système de conduite automatisé par le conducteur ou le centre de supervision humaine, les passagers ou les autres usagers de la route (le cas échéant).

II. Description des fonctions du système de conduite automatisé

2. Il devrait être fourni une description simple de toutes les fonctions, y compris les stratégies de contrôle du système de conduite automatisé et les méthodes employées pour effectuer les tâches relatives à la dynamique dans le domaine de conception fonctionnelle et les limites dans lesquelles le système de conduite automatisé est conçu pour fonctionner, notamment une déclaration du ou des mécanismes au moyen desquels est exercé le contrôle.
3. Cette description devrait être accompagnée d'une liste de toutes les variables d'entrée et de toutes les variables détectées, de la définition de leur plage de fonctionnement, ainsi que de la description de la manière dont chaque variable affecte le comportement du système.
4. Il devrait être fourni par ailleurs une liste de toutes les variables de sortie qui sont contrôlées par le système de conduite automatisé, et, dans chaque cas, il y a lieu d'indiquer si la commande est directe ou si elle est exercée par un autre système du véhicule. La plage de commande (voir par. 2.7) pour chaque variable devrait être définie.

III. Architecture et schémas du système de conduite automatisé

A. Inventaire des composants

5. Il devrait être fourni une liste de l'ensemble des modules du système de conduite automatisé mentionnant quels autres systèmes du véhicule sont nécessaires pour exécuter la fonction de contrôle.

Il devrait être fourni un schéma faisant apparaître la combinaison de ces modules et précisant la répartition des matériels et les interconnexions.

6. Ce schéma devrait comprendre :

- a) La perception et la détection d'objets, y compris la cartographie et la localisation ;
- b) La caractérisation de la prise de décisions ;
- c) La surveillance et le contrôle à distance par un centre de contrôle à distance (le cas échéant) ;
- d) L'affichage des informations/l'interface utilisateur ;
- e) Le système de stockage des données pour la conduite automatisée.

B. Fonctions des modules

7. La fonction de chaque module du système de conduite automatisé devrait être décrite et les signaux qui relient ce module à d'autres modules ou à d'autres systèmes du véhicule devraient être précisés. Cette exigence peut être remplie par la fourniture d'un diagramme fonctionnel ou d'un autre schéma étiqueté, ou par une description appuyée sur un tel schéma.

8. Les interconnexions au sein du système de conduite automatisé devraient être représentées par un schéma de circuit pour les liaisons de transmission électrique, par un schéma de tuyauterie pour les équipements de transmission pneumatique ou hydraulique et par un schéma simplifié pour les liaisons mécaniques. Les liaisons de transmission à destination et en provenance d'autres systèmes devraient également être indiquées.

9. La correspondance entre les liaisons de transmission et les signaux transportés entre les modules devrait être clairement indiquée. Les priorités des signaux sur les voies de données multiplexées devraient être spécifiées chaque fois que la priorité peut être un problème affectant l'efficacité ou la sécurité.

C. Identification des modules

10. Chaque module devrait être identifiable de manière claire et non ambiguë (par exemple, au moyen d'une marque pour le matériel et d'une marque ou d'une sortie logicielle pour le contenu logiciel) afin de permettre la correspondance entre le matériel et les documents. Lorsque la version d'un logiciel peut être modifiée sans qu'il soit nécessaire de remplacer le marquage ou le composant, l'identification du logiciel doit se faire uniquement au moyen d'un signal informatique.

11. Lorsque des fonctions sont combinées au sein d'un seul module, voire d'un seul ordinateur, mais qu'elles sont présentées en plusieurs blocs dans le diagramme fonctionnel pour des raisons de clarté et de facilité d'exposition, une seule marque d'identification du matériel devrait être utilisée. En utilisant cette marque d'identification, le constructeur affirme que le matériel fourni est conforme au document correspondant.

12. L'identification définit les versions des éléments matériels et logiciels. Lorsque ces derniers changent de telle manière que cela modifie la fonction du module en ce qui concerne le présent Règlement, cette identification devrait également être modifiée.

D. Installation des composants du système de capteurs

13. Le constructeur devrait fournir des informations concernant les options d'installation qui seront utilisées pour les différents composants du dispositif de détection. Ces options comprennent, sans s'y limiter, l'emplacement du composant dans ou sur le véhicule, le ou les matériaux à proximité du composant une fois celui-ci installé sur le véhicule, le dimensionnement et la géométrie de ces matériaux ainsi que leur finition de surface. Ces informations devraient également comprendre les spécifications d'installation qui sont essentielles pour l'efficacité du système de conduite automatisé, par exemple, les tolérances concernant l'angle d'installation.

14. Les modifications apportées aux différents composants du système de capteurs ou aux options d'installation devraient donner lieu à une mise à jour de la documentation.

E. Spécifications du système de conduite automatisé

15. Description des spécifications du système de conduite automatisé en conditions normales et en conditions d'urgence, description des critères d'acceptabilité et démonstration du respect de ces critères.

16. Liste des règlements, codes et normes appliqués.

F. Le concept de sécurité et sa validation par le constructeur

17. Le constructeur devrait fournir une déclaration établissant que le système de conduite automatisé est exempt de risques déraisonnables pour le conducteur (le cas échéant), les passagers et les autres usagers de la route.

18. En ce qui concerne les logiciels utilisés dans le système de conduite automatisé, l'architecture générale devrait être expliquée et les méthodes et outils de conception utilisés devraient être identifiés (voir 3.5.1). Le constructeur devrait apporter la preuve des moyens par lesquels il a déterminé la réalisation de la logique du système de conduite automatisé, au cours du processus de conception et d'élaboration.

19. Le constructeur devrait fournir une explication sur les dispositifs de sécurité fonctionnelle et opérationnelle intégrés au système de conduite automatisé lors de sa conception. Il peut s'agir des éléments suivants :

- a) Un fonctionnement de secours utilisant un système partiel ;
- b) La redondance avec un système distinct ;
- c) La suppression de la ou des fonctions de conduite automatisée.

20. Si le dispositif choisi sélectionne un mode de fonctionnement avec efficacité partielle dans certaines conditions de défektivité (par exemple, en cas de défaillances graves), ces conditions devraient être indiquées (par exemple, le type de défaillance grave), et les limitations de l'efficacité qui en découlent ainsi que la stratégie d'avertissement du conducteur/du centre de supervision à distance (le cas échéant) devraient être définies (par exemple, déclenchement immédiat d'une manœuvre d'atténuation maximale des risques).

21. Si le dispositif choisi sélectionne un deuxième moyen (de secours) pour effectuer les tâches relatives à la conduite dynamique, les principes du mécanisme de commutation, la logique et le niveau de redondance et tout dispositif intégré de contrôle de secours devraient être expliqués et les limitations de l'efficacité du système de secours qui en découlent devraient être définies.

22. Si le dispositif choisi sélectionne la suppression de la fonction de conduite automatisée, cette suppression devrait être effectuée conformément aux dispositions pertinentes du Règlement ONU n° 157 (Système automatisé de maintien dans la voie). Tous les signaux de commande de sortie correspondants associés à cette fonction devraient être bloqués.

23. Les documents devraient être étayés par une analyse montrant en termes généraux la manière dont le système de conduite automatisé se comportera pour atténuer ou éviter les dangers qui peuvent avoir une incidence sur la sécurité du conducteur (le cas échéant), des passagers et des autres usagers de la route. Ils devraient établir les modalités de gestion des scénarios dangereux inconnus par le constructeur visant à maintenir sous contrôle le niveau de risque résiduel.

24. La ou les méthodes analytiques choisies devraient être établies par le constructeur et mises à la disposition de l'autorité compétente avant la mise sur le marché.

25. L'auditeur devrait procéder à une évaluation de l'application de la ou des méthodes d'analyse :

a) Inspection de la stratégie en matière de sécurité au niveau du concept (véhicule). Cette stratégie devrait être fondée sur une analyse des dangers et des risques adaptée à la sécurité du système ;

b) Inspection de la stratégie en matière de sécurité au niveau du système de conduite automatisé, y compris une méthode descendante (du danger éventuel à la conception) et ascendante (de la conception aux dangers éventuels). La stratégie en matière de sécurité peut être fondée sur une analyse des modes de défaillance et de leurs effets, une analyse de l'arbre des défaillances et une analyse du processus théorique du système ou tout autre processus similaire approprié à la sécurité fonctionnelle et opérationnelle du système ;

c) Inspection des plans et résultats de validation et de vérification, y compris des critères d'acceptation appropriés. Cela comprend des essais de validation appropriés, par exemple, des essais de type « matériel incorporé » (Hardware in the loop/HIL), des essais fonctionnels sur route, des essais avec des utilisateurs finaux réels ou tout autre type d'essai approprié pour la validation et la vérification.

26. Les résultats de la validation et de la vérification peuvent être évalués en analysant le domaine abordé par les différents essais et en fixant des seuils de portée minimaux pour diverses mesures.

27. Le dossier d'information devrait confirmer que les alinéas a) à c) ci-dessus tiennent compte, le cas échéant, d'au moins chacun des éléments suivants :

- i) Des questions liées aux interactions avec d'autres systèmes du véhicule (par exemple, le freinage ou la direction) ;
- ii) Des défaillances du système de conduite automatisé et des réactions du système visant à atténuer les risques ;
- iii) Des situations autorisées par le domaine de conception fonctionnelle dans lesquelles un système peut créer des risques déraisonnables pour la sécurité du conducteur (le cas échéant), des passagers et des autres usagers de la route en raison de perturbations fonctionnelles (par exemple, compréhension insuffisante ou erronée de l'environnement du véhicule, incompréhension de la réaction du conducteur (le cas échéant), des passagers ou des autres usagers de la route, contrôle inadéquat, scénarios difficiles) ;
- iv) De la détermination des scénarios pertinents dans le cadre des conditions limites, de la méthode de gestion utilisée pour choisir les scénarios et des outils de validation sélectionnés ;
- v) Du processus de prise de décisions en vue de l'exécution des tâches relatives à la conduite dynamique (par exemple, manœuvres d'urgence), pour la gestion des interactions avec les autres usagers de la route et le respect des règles de circulation ;
- vi) Des cyberattaques ayant une incidence sur la sécurité du véhicule ;
- vii) Des utilisations abusives, raisonnablement prévisibles, par le conducteur (le cas échéant, par exemple, système de détection de la disponibilité du conducteur et explication sur la manière dont les critères de disponibilité ont été établis), des erreurs ou malentendus de la part du conducteur (par exemple,

une reprise de contrôle involontaire) et de l'altération intentionnelle du système de conduite automatisé.

28. Le dossier d'information devrait établir que l'argumentation à l'appui du concept de sécurité est compréhensible et logique et mise en œuvre dans les différentes fonctions des systèmes de conduite automatisés.

29. Il devrait également démontrer que les plans de validation sont suffisamment solides pour garantir la sécurité (par exemple, une portée raisonnable des essais des scénarios sélectionnés par l'outil de validation choisi) et qu'ils ont été réalisés.

30. Il devrait prouver par ailleurs que le véhicule ne présente pas de risques déraisonnables pour le conducteur (le cas échéant), les occupants du véhicule et les autres usagers de la route dans son domaine de conception opérationnelle, grâce à :

a) Un objectif de validation global (notamment des critères d'acceptation de la validation) étayé par des résultats de validation, démontrant que la mise en service du système de conduite automatisé n'augmentera pas globalement le niveau de risque pour le conducteur (le cas échéant), les occupants du véhicule et les autres usagers de la route par rapport à un véhicule à conduite manuelle ;

b) Une stratégie particulière à chaque scénario montrant que le système n'augmentera globalement pas le niveau de risque pour le conducteur (le cas échéant), les passagers et les autres usagers de la route par rapport à un véhicule à conduite manuelle pour chacun des scénarios pertinents pour la sécurité.

31. Le dossier d'information devrait permettre à l'autorité de certification d'effectuer des essais pour vérifier le concept de sécurité.

32. Le dossier d'information devrait détailler les paramètres contrôlés et indiquer, pour chaque situation de défaillance du type défini au paragraphe 3.4.4 de la présente annexe, le signal d'avertissement à donner au conducteur (le cas échéant), aux occupants du véhicule ou aux autres usagers de la route et au personnel des services techniques ou du contrôle technique.

33. Le dossier d'information devrait également décrire les mesures mises en place pour garantir que le système de conduite automatisé ne présente pas de risques déraisonnables pour le conducteur (le cas échéant), les occupants du véhicule et les autres usagers de la route lorsque l'efficacité du système est affectée par les conditions environnementales, par exemple, le climat, la température, la pénétration de poussière ou d'eau ou la formation de glace.

G. Système de stockage des données

34. La documentation devrait décrire :

a) L'emplacement de stockage des données et les mesures visant à assurer leur préservation en cas d'accident ;

b) Les données enregistrées au cours du fonctionnement du véhicule et lors de la survenance d'événements ;

c) Les mesures de sécurité des données et de protection contre l'accès ou l'utilisation non autorisés ;

d) Les moyens et outils mis en place pour gérer l'accès autorisé aux données.

H. Cybersécurité

35. La documentation devrait décrire :

a) La gestion de la cybersécurité et des mises à jour logicielles ;

b) L'identification des risques et les mesures d'atténuation ;

- c) Les risques secondaires et l'évaluation des risques résiduels ;
- d) La mise en place d'une procédure de mise à jour des logiciels et d'une gestion des diverses versions pour répondre aux exigences réglementaires.

I. Dispositions relatives à l'information des utilisateurs

36. La documentation devrait décrire :
- a) Un modèle des informations fournies aux utilisateurs (notamment les tâches relatives à la conduite incombant au conducteur dans le cadre du domaine de conception fonctionnelle et hors de celui-ci) ;
 - b) Un extrait de la partie pertinente du manuel d'utilisation.

J. Système de gestion de la sécurité

37. Le constructeur devrait disposer d'un système de gestion de la sécurité valide pour le système de conduite automatisé concerné et devrait signaler tout changement susceptible d'affecter la pertinence de ce système de gestion de la sécurité pour le système de conduite automatisé en question.

K. Type de documentation à fournir

38. Le constructeur devrait fournir un dossier d'information décrivant la conception de base du système et les moyens par lesquels il est relié à d'autres systèmes du véhicule ou par lesquels il contrôle directement les variables de sortie.

39. La ou les fonctions du système, y compris les stratégies de contrôle et le concept de sécurité tels que définis par le constructeur, devraient être expliquées.

40. Le dossier devrait être bref, tout en apportant la preuve que la conception et l'élaboration ont bénéficié de l'avis d'experts dans tous les domaines du système de conduite automatisé qui sont concernés.

41. En ce qui concerne les inspections techniques périodiques, il devrait décrire la manière dont l'état fonctionnel du système à un moment donné peut être vérifié.

42. Le dossier devrait fournir des informations sur la manière dont le ou les numéros de version du logiciel et l'état du signal d'avertissement de défaillance peuvent être lus de manière normalisée en utilisant une interface de communication électronique, ne serait-ce que l'interface standard (port du système d'autodiagnostic).

43. Le dossier de documentation devrait montrer que le système de conduite automatisé :

- a) Est conçu et a été élaboré pour fonctionner de manière à être exempt de risques déraisonnables pour le conducteur (le cas échéant), les passagers et les autres usagers de la route à l'intérieur du domaine de conception fonctionnelle et des limites déclarés ;

- b) Respecte les prescriptions fonctionnelles énoncées ailleurs par le groupe FRAV ;

- c) A été mis au point selon le processus ou la méthode d'élaboration déclarés par le constructeur.

44. La documentation devrait comporter trois parties :

- a) Une fiche de renseignements soumise à l'autorité, comprenant des informations succinctes sur les points énumérés ;

- b) Le dossier de documentation officiel, annexé au dossier d'information, qui devrait être fourni à l'autorité de certification aux fins de la réalisation de l'évaluation de la sécurité ;

c) Les données confidentielles supplémentaires et les données d'analyse (propriété intellectuelle) qui sont à conserver par le constructeur, mais qui devraient être ouvertes à l'inspection (par exemple, sur place dans les installations techniques du constructeur) au moment de l'évaluation du produit ou de la vérification du processus. Le constructeur veillera à ce que ces données matérielles et analytiques restent disponibles pendant une période de dix ans à compter de la date d'arrêt définitif de la production du système de conduite automatisé.

45. Toute modification de la conception de la sécurité du système de conduite automatisé devrait être notifiée, le cas échéant, à l'autorité compétente.

Annexe V

Prescriptions relatives à l'audit du système de gestion de la sécurité du constructeur pour les systèmes de conduite automatisés

Généralités

L'audit du système de gestion de la sécurité mis en place par le constructeur a pour but de démontrer que ce dernier dispose de processus solides pour gérer les risques et assurer la sécurité tout au long du cycle de vie du système de conduite automatisé (durant la phase de développement et de production, mais aussi en cours de fonctionnement sur route et lors de la mise hors service). Cet audit devrait comporter des mesures appropriées permettant de contrôler le véhicule sur le terrain et de prendre les mesures adéquates le cas échéant.

I. Système de gestion de la sécurité

1. En ce qui concerne le système de gestion de la sécurité, la documentation fournie par un constructeur devrait démontrer que des processus, méthodes et outils efficaces sont en place, actualisés et suivis au sein de l'entreprise, en vue de gérer la sécurité et la conformité de manière continue tout au long du cycle de vie du produit (conception, élaboration, production, fonctionnement, y compris le respect des règles de circulation, et mise hors service).

2. Lignes directrices :

Note : La gestion des risques pour la sécurité est une activité essentielle qui vient à l'appui du système de gestion de la sécurité et qui contribue par ailleurs à l'efficacité d'autres processus organisationnels. La « gestion des risques pour la sécurité », par opposition à l'expression plus générique de « gestion des risques », est censée se limiter à la gestion des risques en matière de sécurité, sans prise en compte des risques financiers, juridiques, économiques, et autres.

3. Le contrôle des risques peut être réalisé dans trois dimensions essentielles :

a) La composante humaine, grâce à des personnes dotées des compétences, de la formation et de la motivation appropriées ;

b) Une composante organisationnelle, formée de procédures et de méthodes définissant les relations entre les tâches ;

c) Une composante technique faisant appel aux outils et aux équipements appropriés.

4. La mise en place d'un système de gestion de la sécurité adéquat permet de surveiller et d'améliorer l'ensemble des trois dimensions et de contrôler les risques correspondants. L'évaluation du système de gestion de la sécurité repose sur des normes d'ingénierie automobile, des manuels et des documents relatifs aux meilleures pratiques en matière de sécurité.

5. Les risques opérationnels liés au produit devraient être spécifiquement abordés dans le chapitre consacré à la conception et au développement et mis en œuvre dans l'évaluation du produit. Cette section a pour but d'illustrer le lien entre le processus global de gestion des risques (conformément au présent chapitre) et les risques opérationnels liés au produit.

6. Exemples de processus et d'éléments à documenter :

a) Identification des risques (conformément à la norme ISO 3100, par. 6.4.2, ou à une norme équivalente) ;

b) Analyse des risques (conformément à la norme ISO 3100, par. 6.4.3, ou à une norme équivalente) ;

- c) Évaluation des risques (conformément à la norme ISO 3100, par. 6.4.4, ou à une norme équivalente) ;
- d) Traitement des risques (conformément à la norme ISO 3100, par. 6.4.5, ou à une norme équivalente), dont :
 - e) Les processus utilisés pour assurer dans la mesure du possible l'actualisation des évaluations des risques ;
 - f) La performance de l'organisation en matière de sécurité et l'efficacité des contrôles des risques pour la sécurité.

7. Exemples de processus et de points à documenter :

- a) Gouvernance de la sécurité :
 - i) Politiques et principes de sécurité (conformément au concept énoncé dans les normes ISO 21434, par. 5.4.1, et ISO 9001 Automotive 5.2, mais du point de vue de la sécurité) ;
 - ii) Engagement de la direction (conformément au concept énoncé dans les normes ISO 21434, par. 5.4.1, et ISO 9001 Automotive 5.1, mais du point de vue de la sécurité) ;
 - iii) Rôles et responsabilités (ISO 26262-2, par. 6.4.2, concernant aussi bien les activités organisationnelles que celles qui dépendent du projet).
- b) Culture de la sécurité (ISO 26262-2, par. 5.4.2) ;
- c) Audit interne et externe (périodique), visant à s'assurer que tous les processus du système de gestion de la sécurité sont mis en œuvre de manière cohérente (Règlement ONU n° 157, par. 3.5.5, et norme ISO 26262-2, par. 6.4.11) ;
- d) Communication efficace au sein de l'organisation (ISO 26262-2, par. 5.4.2.3) ;
- e) Partage d'informations en dehors de l'organisation (conformément au concept énoncé dans les normes ISO 21434, par. 5.4.5, et ISO 9001, mais du point de vue de la sécurité) ;
- f) Système de gestion de la qualité (IATF 16949, par exemple) à l'appui de l'ingénierie de la sécurité, y compris la gestion des changements, la gestion de la configuration, la gestion des prescriptions, la gestion des outils, etc.

8. Exemples de processus et de points à documenter pour s'assurer de la robustesse de la phase de production :

- a) Accréditation du système de gestion de la qualité (IATF 16949 ou ISO 9001 par exemple, ou équivalent) ;
- b) Description générale de la manière dont l'organisation exécute toutes les fonctions de production, y compris la gestion des conditions de travail et de l'environnement, des équipements et des outils.

9. Exemples de processus et de points à documenter pour assurer la fiabilité de la production décentralisée :

- a) Relations entre le constructeur du véhicule et toutes les autres entités (partenaires ou sous-traitants) impliquées dans la production du système/véhicule ;
- b) Critères d'acceptabilité des « sous-systèmes/composants » fabriqués par d'autres partenaires ou sous-traitants (c'est-à-dire, déploiement des prescriptions en matière d'assurance de la production dans la chaîne d'approvisionnement).

10. Le processus de conception et d'élaboration devrait être établi et documenté, y compris le système de gestion de la sécurité, la gestion et la mise en œuvre des prescriptions, les essais, le suivi des défaillances, les mesures correctives et la mise en service.

11. Lignes directrices :
12. Exemples de processus et de points à documenter pour garantir la fiabilité de la phase de conception et de développement :
- a) Description générale de la manière dont l'organisation réalise toutes les activités de conception et de développement ;
 - b) Développement, intégration et mise en œuvre du système/véhicule :
 - i) Gestion des prescriptions (compréhension et validation des prescriptions, par exemple) ;
 - ii) Stratégies de validation, notamment, mais sans s'y limiter :
 - a. Évaluation de la crédibilité de la simulation (lien vers sous-groupe 2) ;
 - b. Niveau d'intégration du système ;
 - c. Niveau logiciel ;
 - d. Niveau matériel.
 - iii) Gestion de la sécurité fonctionnelle et de la sécurité de la fonction attendue, notamment analyse et mise à jour permanentes des évaluations des risques et lien avec la sécurité de fonctionnement.
 - c) Gestion des modifications de conception et des processus de conception et de développement.
13. Le constructeur devrait mettre en place et entretenir des canaux de communication efficaces entre ses services chargés de la sécurité fonctionnelle et opérationnelle, de la cybersécurité et de tout autre domaine pertinent contribuant à la sécurité des véhicules.
14. Lignes directrices :
15. Exemples de processus et de points à documenter pour s'assurer que les responsabilités sont assumées de manière adéquate :
- a) Rôles et responsabilités durant la conception et le développement ;
 - b) Qualifications et expérience des personnes chargées des décisions en matière de sécurité ;
 - c) Coordination entre conception et production.
16. Le constructeur devrait disposer de processus destinés au suivi des incidents/accidents/collisions occasionnés par le système de conduite automatisé, ainsi que d'un processus destiné à gérer les lacunes potentielles en matière de sécurité après l'immatriculation (surveillance sur le terrain en boucle fermée) et à mettre à jour les véhicules. Ces processus devraient signaler les incidents critiques (par exemple, une collision avec un autre usager de la route et les lacunes potentielles en matière de sécurité) à l'autorité compétente lorsqu'ils se produisent.
17. Lignes directrices : Lien avec la composante Surveillance en fonctionnement et notification. Il appartient aux constructeurs de mettre en place un processus pour la phase opérationnelle afin de confirmer le respect des prescriptions de sécurité sur le terrain, de procéder à la détection précoce de nouveaux scénarios inconnus (conformément à l'objectif de développement de la sécurité de la fonction attendue visant à minimiser ces scénarios inconnus), d'enquêter sur les événements et de partager les enseignements tirés des incidents et de l'analyse des quasi-accidents, pour permettre ainsi à l'ensemble de la communauté de profiter du retour d'expérience et contribuer ainsi à l'amélioration continue de la sécurité automobile.
18. Exemple de principes directeurs : Existe-t-il un document décrivant la procédure à suivre pour signaler les incidents à la direction ? Est-il établi que l'entreprise respecte cette procédure ? Existe-t-il un document décrivant la procédure appropriée d'enquête et de documentation des incidents ? Est-il établi que l'entreprise se conforme à cette procédure ?

19. Le constructeur devrait démontrer que des vérifications périodiques indépendantes des processus internes sont effectuées pour s'assurer que les processus établis conformément aux prescriptions énoncées dans cette annexe sont mis en œuvre de manière cohérente.

20. Lignes directrices :

21. Exemples de processus et de points à documenter pour garantir l'indépendance de l'audit et de l'évaluation de la conception :

a) Garantie que toutes les pratiques et procédures à appliquer pendant le développement du véhicule sont respectées (garantie de processus) ;

b) Garantie d'une vérification indépendante du respect des prescriptions et des réglementations applicables (évaluation indépendante réalisée par une personne sans rapport avec les données de conformité) ;

c) Processus visant à assurer l'évaluation continue du système de gestion de la sécurité afin d'en garantir l'efficacité à tout moment (l'audit du système peut être entrepris par le système de gestion de la qualité en place).

22. Le constructeur devrait mettre en place des dispositions appropriées (par exemple, des dispositions contractuelles, des interfaces claires et un système de gestion de la qualité) avec ses fournisseurs pour s'assurer de la conformité de leur système de gestion de la sécurité avec les prescriptions des paragraphes 1 (sauf en ce qui concerne le fonctionnement des véhicules et leur retrait du service), 2, 3 et 5.

23. Lignes directrices :

24. Exemples de processus et de points à documenter :

a) Politique organisationnelle pour la chaîne d'approvisionnement ;

b) Intégration des risques émanant de la chaîne d'approvisionnement ;

c) Évaluation des capacités des fournisseurs s'agissant du système de gestion de la sécurité et audits correspondants ;

d) Processus de conclusion de contrats et d'accords visant à garantir la sécurité au cours des phases de développement, de production et de post-production ;

e) Processus pour les activités de sécurité décentralisées.

25. Expiration/renouvellement du système de gestion de la sécurité

26. La documentation devrait être régulièrement mise à jour en fonction des modifications apportées aux processus du système de gestion de la sécurité. Toute modification de la documentation de ce système devrait être notifiée, le cas échéant, à l'autorité compétente.

Annexe VI

Prescriptions relatives à la surveillance en fonctionnement et à la notification pour les systèmes de conduite automatisés

Généralités

La composante Surveillance en fonctionnement et notification est utilisée par le constructeur pour surveiller les performances de sécurité d'un système de conduite automatisé en service et produire des rapports de surveillance. Elle s'applique aux situations qui mettent en danger, ou qui sont susceptibles de mettre en danger, faute d'intervention, un véhicule, ses occupants ou toute autre personne. Plus généralement, elle s'applique à toutes les situations en lien avec les performances du système de conduite automatisé sur le plan de la sécurité. On trouvera dans l'annexe I des exemples de ces situations.

La composante permet de mettre en évidence les risques déraisonnables que présente l'utilisation de véhicules équipés d'un système de conduite automatisé sur la voie publique, ainsi que d'évaluer les performances de ces véhicules en matière de sécurité lorsqu'ils sont utilisés en conditions réelles.

Dans le cadre de cette composante, les constructeurs de systèmes de conduite automatisés doivent collecter et analyser les données en lien avec la sécurité pour leurs véhicules en service qui sont équipés de ces systèmes et communiquer à l'autorité compétente les préoccupations relatives à la sécurité, les nouveaux scénarios et les indicateurs de performance. Le constructeur d'un système de conduite automatisé est responsable des performances de sécurité dudit système tant que celui-ci est en service.

La composante Surveillance en fonctionnement et notification fournit aux autorités chargées de la sécurité des informations provenant du constructeur, en complément des informations qu'elles peuvent recueillir auprès d'autres sources.

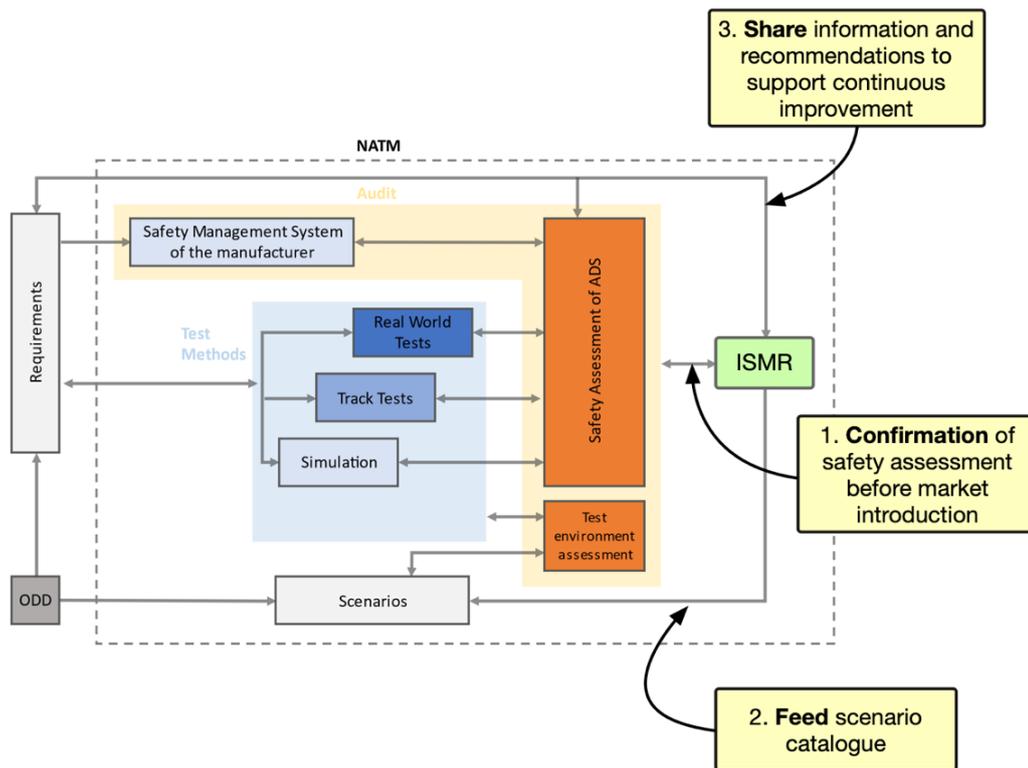
I. Objectifs

1. La composante Surveillance en fonctionnement et notification permet de contribuer au renforcement de la sécurité routière par la collecte, le traitement et la diffusion d'informations pertinentes sur la sécurité.
2. Trois objectifs majeurs sont fixés dans le cadre de l'utilisation de la composante :
 - a) Recenser les risques associés aux systèmes de conduite automatisés à éliminer, notamment les cas de non-conformité aux prescriptions de sécurité applicables à ces systèmes (objectif 1) ;
 - b) Contribuer à l'enrichissement du catalogue de scénarios par la mise en évidence de nouveaux scénarios pertinents sur le plan de la sécurité des systèmes de conduite automatisés (objectif 2) ;
 - c) Diffuser des informations et des recommandations visant à promouvoir l'amélioration continue des performances de sécurité des systèmes de conduite automatisés (objectif 3).
3. Le niveau de sécurité effectif des véhicules qui ont été commercialisés doit être évalué une fois qu'un nombre suffisant de véhicules a été mis en service et que ceux-ci ont été exposés à une variété suffisante de conditions de circulation et de conditions environnementales. Par conséquent, il importe de mettre en place un mécanisme de retour d'information (information relative à la surveillance des véhicules) qui confirmera la validité du concept de sécurité par conception, ainsi que la validation réalisée par le constructeur avant la mise sur le marché du véhicule. Le retour d'information permettra d'évaluer a posteriori les exigences réglementaires et les méthodes de validation, et fournira des indications sur les lacunes à combler et les modifications à apporter.

4. Par exemple, l'exploitation des données sur les performances du système de conduite automatisé en conditions réelles peut contribuer à améliorer les essais sur piste ou à mettre au point de nouveaux essais de ce type. En outre, s'agissant des interactions avec l'utilisateur du véhicule, la composante Surveillance en fonctionnement et notification peut fournir des données exploitables pour améliorer l'interface homme-machine du système de conduite automatisé, l'utilisabilité du système et la formation des conducteurs.
5. De nouveaux scénarios et de nouveaux risques peuvent apparaître en conditions réelles d'utilisation du système de conduite automatisé. La composante Surveillance en fonctionnement et notification peut alors contribuer à l'introduction des nouveaux scénarios dans le catalogue de scénarios afin de gérer les nouveaux risques.
6. Enfin, au cours de la phase initiale de commercialisation des systèmes de conduite automatisés, il est essentiel que tous les spécialistes du secteur tirent les enseignements des situations critiques impliquant des véhicules automatisés/autonomes, afin de pouvoir réagir rapidement et apporter des améliorations destinées à réduire le nombre de situations critiques et à éviter celles-ci pour tous les autres systèmes de conduite automatisés.
7. La collecte, le traitement et la diffusion des données sur les performances de sécurité des systèmes de conduite automatisés obtenues à l'aide de la composante Surveillance en fonctionnement et notification aideront en outre à évaluer les incidences de l'utilisation de ces systèmes sur les routes.

Figure 1

La composante Surveillance en fonctionnement et notification dans l'approche à plusieurs composantes



II. Définitions

8. On trouvera ci-dessous pour rappel les définitions des termes employés dans le contexte de la présente annexe, établies par le groupe FRAV.

9. On entend par « *système de conduite automatisé* » le matériel et le logiciel qui sont ensemble capables d'exécuter de manière continue la totalité de la tâche de conduite dynamique.
10. On entend par « *fonctionnalité du système de conduite automatisé* » une application d'un système de conduite automatisé conçue spécialement pour être utilisée dans un domaine de conception fonctionnelle.
11. On entend par « *fonction du système de conduite automatisé* » une application du matériel et du logiciel du système de conduite automatisé conçue pour exécuter une partie spécifique de la tâche de conduite dynamique.
12. On entend par « *tâche de conduite dynamique* » les fonctions concrètes et tactiques devant être assurées en temps réel pour conduire un véhicule équipé d'un système de conduite automatisé dans la circulation routière.
- a) Sont exclues les fonctions stratégiques telles que la planification d'un itinéraire et la sélection de destinations et de lieux de passage.
- b) Les fonctions visées peuvent être groupées logiquement dans trois grandes catégories :
- i) Détection et perception ;
- ii) Planification et décision ;
- iii) Maîtrise du véhicule.
13. On entend par « *domaine de conception fonctionnelle* » les conditions dans lesquelles une fonctionnalité d'un système de conduite automatisé est spécialement conçue pour fonctionner.
14. On entend par « *sortie du domaine de conception fonctionnelle* » :
- a) Le fait qu'une ou plusieurs conditions se situent en dehors des limites établies pour l'utilisation de la fonctionnalité du système de conduite automatisé, ou
- b) Le fait qu'une ou plusieurs conditions requises pour la fonctionnalité du système de conduite automatisé soient absentes.
15. On entend par « *transfert de contrôle* » le transfert du contrôle dynamique du véhicule entre le système de conduite automatisé et l'utilisateur de secours.
16. On entend par « *demande de transfert de contrôle* » un avertissement communiqué par le système de conduite automatisé à l'utilisateur de secours pour lui signifier qu'il doit reprendre le contrôle dynamique du véhicule.
17. On entend par « *prise en compte de la demande de transfert de contrôle* » la reprise du contrôle dynamique du véhicule par l'utilisateur de secours en réponse à une demande de transfert de contrôle.

III. Surveillance en fonctionnement

18. Chaque constructeur devrait mettre en place un programme de surveillance dans le but de collecter et d'analyser des données sur ses véhicules, ainsi que des données provenant d'autres sources, et de se renseigner ainsi sur les performances de sécurité du système de conduite automatisé en service, conformément aux prescriptions de la composante Audit relatives au système de gestion de la sécurité.

A. Collecte de données sur les véhicules

19. Actuellement, les enregistreurs de données de route et les systèmes de stockage des données pour la conduite automatisée s'emploient pour recueillir des données à partir d'un véhicule équipé d'un système de conduite automatisé. Par la suite, la présente section devrait faire référence aux éléments de données que les constructeurs pourront collecter et

télécharger à partir de leurs véhicules équipés de systèmes de conduite automatisés en vue de les assembler et de les traiter pour produire des indicateurs de performance tels qu'ils sont décrits dans la section consacrée aux rapports.

B. Autres sources d'information sur les performances des systèmes de conduite automatisés accessibles aux constructeurs

20. Il est probable que les constructeurs recueilleront des informations relatives aux activités courantes, notamment des rapports établis par les concessionnaires ainsi que des informations communiquées par les clients.

IV. Rapports

21. Les rapports sur les incidents ont pour objet de prévenir les accidents et les incidents, et non de sanctionner ou d'attribuer des fautes.

22. On entend par « *incident* » tout événement en lien avec la sécurité dans lequel est impliqué un véhicule équipé d'un système de conduite automatisé.

23. Aux fins des rapports, on distingue deux catégories d'incidents :

24. Les « *incidents non critiques* » : interruption de fonctionnement, défaut, défaillance ou autre événement ayant eu ou pouvant avoir eu une incidence sur la sécurité du système de conduite automatisé, mais n'ayant pas causé un accident ou un incident grave. Cette catégorie englobe notamment les incidents mineurs, les situations ne perturbant pas le fonctionnement normal, les manœuvres d'urgence ou complexes visant à empêcher une collision et, plus généralement, toutes les situations en lien avec la sécurité du système de conduite automatisé sur route (transfert de contrôle, interaction avec un opérateur à distance, etc.).

25. Les « *incidents critiques* » : toutes les situations dans lesquelles le système de conduite automatisé est engagé au moment où elles se produisent et en raison desquelles :

a) Au moins une personne blessée a besoin d'une assistance médicale du fait qu'elle se trouvait dans le véhicule ou qu'elle a été victime de l'incident ;

b) Le véhicule équipé du système de conduite automatisé, d'autres véhicules ou des objets fixes ont subi des dégâts d'une certaine importance, ou un coussin gonflable s'est déclenché sur un quelconque véhicule impliqué dans l'incident.

A. Rapports que les constructeurs devraient établir

26. Les constructeurs devraient rendre compte, conformément aux exigences de l'autorité concernée, des performances de sécurité à court et à long terme des véhicules équipés de systèmes de conduite automatisés, comme indiqué ci-après.

27. Ils devraient signaler toute question à régler en matière de sécurité selon leurs constatations, à savoir :

a) Les prescriptions de sécurité non respectées ;

b) Les questions de performance relative à la sécurité.

28. Les rapports correspondants doivent être établis dans un délai de [un mois]. Ils s'imposent lorsque les données recueillies montrent que le système de conduite automatisé présente un risque inacceptable en cours d'utilisation.

29. On trouvera à l'annexe I la liste des incidents qui doivent être signalés de la sorte.

B. Communication périodique des indicateurs de performance à l'autorité chargée de la sécurité

30. On trouvera dans l'annexe I une liste d'incidents critiques et non critiques conforme aux prescriptions de haut niveau établies par le groupe FRAV. Il s'agit là de situations génériques que le groupe VMAD a l'intention de définir plus en détail. Le groupe VMAD examinera l'utilité de chacune des données qu'il est suggéré de communiquer à l'autorité chargée de la sécurité, la capacité de ladite autorité à passer en revue toutes les données transmises, ainsi que la possibilité de stocker, collecter et communiquer les différentes données.

31. Tous les incidents énumérés dans l'annexe I peuvent faire l'objet d'un rapport périodique.

32. Le rapport périodique devrait être remis tous les [ans] et devrait présenter des données attestant les performances de sécurité du système de conduite automatisé en service. Il devrait notamment montrer que :

a) Aucune incohérence n'a été décelée par rapport aux performances de sécurité du système avant sa commercialisation ;

b) Le système est conforme aux prescriptions de sécurité établies par le groupe FRAV, telles que vérifiées selon les méthodes d'essai mises au point par le groupe VMAD ;

c) Tout problème majeur de sécurité du système récemment découvert a été convenablement pris en compte.

33. Tous les rapports devraient comporter deux parties, conformément aux exigences de l'autorité concernée :

a) Le rapport lui-même, contenant les informations correspondant aux points a) et b) ci-dessus ;

b) Les données sur lesquelles s'appuie le rapport, échangées avec l'autorité dans un fichier au format convenu.

34. Tout traitement préalable des données devrait être signalé à l'autorité concernée dans le rapport et devrait être achevé avant la génération du fichier d'échange de données.

35. Dans la mesure du possible, les Parties contractantes et leurs autorités nationales compétentes devraient convenir d'une méthode uniforme pour l'établissement des rapports.

36. L'autorité est en droit, au besoin, de vérifier les informations communiquées et de faire des recommandations à l'autorité de contrôle de l'application de la réglementation, ou au constructeur du système de conduite automatisé, afin que des mesures soient prises pour remédier à tout problème décelé constituant un risque déraisonnable pour la sécurité.

V. Prochains débats prévus sur des questions non traitées par le groupe de travail informel VMAD (sous-groupe 3) du GRVA (WP.29)

A. Rapports provenant d'autres sources

37. L'intérêt de la composante Surveillance en fonctionnement et notification dépendra de la disponibilité de données sur les performances des systèmes de conduite automatisés en matière de sécurité. Ainsi, en limitant l'exigence de notification aux seuls constructeurs, on limitera également les types d'incidents pouvant être décelés dans le cadre de la surveillance en fonctionnement et, par voie de conséquence, le niveau d'amélioration de la sécurité pouvant être atteint en exploitant les informations obtenues de cette manière. Dans d'autres secteurs des transports, le mécanisme de notification est étendu aux conducteurs, aux opérateurs, aux utilisateurs, aux gestionnaires et à toutes les autres personnes concernées.

La question de savoir s'il est possible d'en faire autant doit faire l'objet d'échanges entre le WP.29 et le WP.1.

38. Par exemple, les incidents liés à une infraction au code de la route ne peuvent être couverts par les seules données collectées à bord du véhicule. En effet, le système de conduite automatisé ne va délibérément enfreindre la loi et n'enregistrera donc aucune donnée puisqu'il ne sait pas qu'il est en infraction. Par conséquent, il est souhaitable qu'une collaboration se mette en place avec les constructeurs, tout comme avec les autorités locales et les utilisateurs de véhicules équipés de systèmes de conduite automatisés, en vue de recenser et signaler les incidents de ce type.

39. Les incidents (critiques ou non) dans lesquels le système de conduite automatisé n'a pas pu détecter un obstacle et y réagir convenablement, en raison d'un faux positif ou d'un faux négatif, font également partie des exemples que l'on peut citer. Si le système n'a pas connaissance de l'obstacle, il ne peut pas l'enregistrer correctement. Dans ce cas, la possibilité d'exploiter des informations fournies par d'autres usagers ou par les infrastructures permet de mieux reproduire et comprendre l'incident.

B. Mise en commun d'informations entre les autorités chargées de la sécurité et les Parties contractantes

40. La composante Surveillance en fonctionnement et notification a pour objet final le renforcement de la sécurité des systèmes de conduite automatisés par la diffusion des enseignements tirés sous la forme de recommandations en matière de sécurité. Ce renforcement sera maximal si la diffusion se fait non seulement au niveau national, mais aussi au niveau international. Les autorités chargées de la sécurité pourraient avoir accès aux rapports des constructeurs, ainsi qu'à d'autres informations pertinentes telles que les données des gestionnaires des autoroutes, les rapports d'enquête sur les accidents, les résultats des recherches ou les statistiques nationales. Un mécanisme de mise en commun des informations entre les autorités chargées de la sécurité au niveau international est souhaitable et pourrait être coordonné par le groupe VMAD du GRVA, sous la direction du WP.29.

Annexe VI – Appendice 1

Liste des incidents qu'il est recommandé de signaler

Un rapport diligent devrait être soumis pour chaque incident critique. Les rapports périodiques devraient quant à eux être soumis sous la forme de compilations de données (par heure de fonctionnement ou par kilomètre parcouru) pour les véhicules équipés d'un système de conduite automatisé en service (système activé). Au cas où un constructeur n'aurait pas accès à toutes les données d'un système en service, l'autorité compétente devrait le conseiller sur la marche à suivre.

La liste d'incidents à signaler présentée ci-après découle des prescriptions de sécurité établies par le groupe FRAV pour les systèmes de conduite automatisés. Les incidents ont été répartis dans trois catégories selon leur pertinence par rapport à la tâche de conduite dynamique, à l'interaction avec les utilisateurs d'un véhicule équipé d'un système de conduite automatisé et aux conditions techniques pour le système. Le tableau ci-après indique pour chaque incident s'il convient de soumettre un rapport diligent ou un rapport périodique.

I. Incidents liés à l'exécution par le système de conduite automatisé de la tâche de conduite dynamique, tels que :

- a) Incidents critiques pour la sécurité (tels que définis précédemment), connus du constructeur du système ou de l'équipementier ;
- b) Incidents liés à l'utilisation du système de conduite automatisé hors de son domaine de conception fonctionnelle ;
Incapacité du système de conduite automatisé à réaliser une manœuvre à risque minimal lorsqu'il le faut ;
- c) Incidents de communication (la connectivité étant pertinente pour le concept de sécurité du système) ;
- d) Incidents liés à la cybersécurité ;
- e) Interaction avec le centre de contrôle à distance (le cas échéant) en cas de défaillance majeure du système de conduite automatisé ou du véhicule.

II. Incidents liés à l'interaction du système de conduite automatisé avec les utilisateurs de véhicules équipés d'un système de conduite automatisé, tels que :

- a) Indisponibilité du conducteur (le cas échéant) et autres incidents liés à l'utilisateur (par exemple, erreurs de l'utilisateur, utilisation inappropriée du système et prévention d'une utilisation inappropriée) ;
- b) Incidents liés à l'échec d'un transfert de contrôle (raison, pourcentage d'opération réalisé) ;
- c) Prévention de la prise de contrôle dans des conditions dangereuses.

III. Incidents liés aux conditions techniques pour le système de conduite automatisé, y compris l'entretien et les réparations :

- a) Incidents liés à la défaillance du système de conduite automatisé, donnant lieu à une demande d'intervention ;
- b) Incidents liés à l'entretien et aux réparations ;
- c) Incidents liés à des modifications non autorisées (manipulations) ;

- d) Modifications apportées par le constructeur du système de conduite automatisé ou l'équipementier pour régler un problème de sécurité identifié et majeur (moyennant les protections adéquates).

IV. Incidents liés aux nouveaux scénarios importants pour la sécurité

Tableau 1

Incidents liés aux nouveaux scénarios importants pour la sécurité

<i>Incident</i>	<i>Rapport diligent [1 mois]</i>	<i>Rapport périodique [1 an]</i>
1.a Incidents critiques pour la sécurité, connus du constructeur du système ou de l'équipementier	X (en cas de risque déraisonnable)	X
1.b Incidents liés à l'utilisation du système de conduite automatisé hors de son domaine de conception fonctionnelle	X	X
1.c Incapacité du système de conduite automatisé à réaliser une manœuvre à risque minimal lorsqu'il le faut ;	X	X
1.d Incidents de communication		X
1.e Incidents liés à la cybersécurité		X
1.f Interaction avec un opérateur à distance, le cas échéant		X
2.a Indisponibilité du conducteur (le cas échéant) et autres incidents liés à l'utilisateur		X
2.b Incidents liés à une défaillance d'un transfert de contrôle		X
2.c Prévention de la prise de contrôle dans des conditions dangereuses		X
3.a Incidents liés à une défaillance du système de conduite automatisé		X
3.b Incidents liés à l'entretien et aux réparations		X
3.c Incidents liés à des modifications non autorisées		X
3.d Modifications apportées par le constructeur du système de conduite automatisé ou l'équipementier pour régler un problème de sécurité identifié et majeur		X
4. Incidents liés à la découverte de nouveaux scénarios importants pour la sécurité	X	X

Annexe VII

Aperçu des méthodes d'essai pour les essais sur piste et les essais en conditions réelles

I. Introduction

1. Un premier aperçu des pratiques de référence, des procédures, des ressources techniques et des outils concernant les essais sur piste et les essais en conditions réelles a été établi⁷.
2. Cet aperçu a montré qu'un grand nombre de procédures et de normes relatives aux essais sur piste ont été élaborées et utilisées pour évaluer la sécurité des véhicules équipés d'un système de conduite automatisé (un système de maintien dans la voie, par exemple), et en particulier d'un système actif d'aide à la conduite, lesquelles peuvent servir de base à l'élaboration, à venir, d'une méthode pour les essais sur piste.
3. Il a également montré qu'aucune procédure visant à évaluer la sécurité des véhicules équipés d'un système de conduite automatisé sur la voie publique n'avait encore été mise au point⁸, la plupart des documents disponibles étant les directives ou spécifications d'essai pour ces véhicules, établies par les équipementiers au cours des phases de développement de leurs systèmes, ou pour les essais avec des conducteurs humains.
4. La présente annexe donne une vue d'ensemble de l'approche conçue pour les essais sur piste et les essais en conditions réelles, à savoir les matrices d'essai. On trouvera dans la deuxième partie de l'annexe plus de détails sur ladite approche, et dans la troisième partie, des considérations qui se rapportent notamment aux prochaines étapes de l'élaboration des méthodes d'essai.

II. Les matrices d'essai

5. Le point de départ de l'élaboration des méthodes pour les essais sur piste et les essais en conditions réelles est la matrice d'essai. L'approche décrite ici suggère l'utilisation d'une matrice générale pour les essais physiques, et de deux matrices spécifiquement conçues pour les essais sur piste d'une part et les essais en conditions réelles d'autre part.
6. La matrice générale pour les essais physiques aurait pour objet de donner une vue d'ensemble claire de la façon dont les prescriptions de sécurité établies par le groupe FRAV pourraient être évaluées au moyen d'essais sur piste, d'essais en conditions réelles, ou des deux à la fois⁹.
7. Les matrices d'essai pour les essais sur piste et les essais en conditions réelles seraient conçues différemment, afin de tenir compte des différents contextes dans lesquels les essais sont menés et de s'assurer que les avantages de chaque méthode d'essai peuvent être mis à profit.

⁷ VMAD-SG4-06-05.

⁸ Le Règlement ONU n° 157 sur les systèmes automatisés de maintien dans la voie contient des dispositions qui s'appliquent aux essais en conditions réelles. Aux fins de l'élaboration d'un essai en conditions réelles dans le cadre de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai, ces dispositions ne sont toutefois pas assez détaillées pour être considérées comme des spécifications comprenant une procédure.

⁹ Cette matrice générale comprendrait uniquement les prescriptions de sécurité appropriées aux essais physiques. Elle exclurait ainsi les prescriptions qui doivent être évaluées à l'aide d'autres composantes de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai. Si le groupe VMAD décidait de donner une vue d'ensemble au niveau de la nouvelle méthode d'évaluation et d'essai, en indiquant la ou les composantes à utiliser pour évaluer la conformité avec les prescriptions de sécurité établies par le groupe FRAV, la matrice générale pourrait alors être intégrée à cette vue d'ensemble.

On notera que les matrices d'essai présentées ici à titre d'exemples ne sont que des illustrations ; elles contiennent donc des critères fictifs.

A. Matrice générale pour les essais physiques

8. La matrice générale offrirait une vue d'ensemble claire du ou des types d'essais physiques à réaliser afin d'évaluer la conformité avec les prescriptions de sécurité applicables établies par le groupe FRAV.

9. L'exemple du tableau 1 illustre le concept de base de la vue d'ensemble à partir d'une sélection des 40 points de sécurité initiaux établis par le groupe FRAV¹⁰. Il convient de noter que cet exemple n'est qu'une illustration et ne devrait pas être considéré comme une expression de la position du groupe VMAD s'agissant de l'applicabilité de chaque méthode d'essai en fonction des points de sécurité.

10. En outre, l'exemple ne tient pas compte des travaux du groupe FRAV sur les points de sécurité depuis la dix-huitième réunion du groupe VMAD. Enfin, ces points devraient être plus amplement détaillés ultérieurement, par l'ajout d'une ou plusieurs prescriptions mesurables par point.

11. Une fois que ces prescriptions mesurables auraient été établies, elles figureraient dans la colonne de gauche du tableau, à la place des points de sécurité actuellement présents.

Tableau 1

Exemple de matrice générale pour les essais physiques

<i>Prescription de sécurité (FRAV)</i>	<i>Essais sur piste</i>	<i>Essais en conditions réelles</i>
1. Le système de conduite automatisé devrait réaliser la tâche de conduite dynamique dans sa totalité.	Oui	Oui
2. Le système de conduite automatisé devrait contrôler les mouvements longitudinaux et latéraux du véhicule.	Oui	Oui
(...)		
7. Le système de conduite automatisé devrait s'adapter en fonction des risques sur le plan de la sécurité.	Oui	Si le cas se présente
8. Le système de conduite automatisé devrait s'adapter en fonction des conditions de circulation.		Oui
(...)		
30. Le système de conduite automatisé devrait gérer en toute sécurité les courtes périodes de sortie du domaine de conception fonctionnelle.	Oui	Oui
31. En cas de collision, le système de conduite automatisé devrait arrêter le véhicule et se désactiver.	Oui	Si le cas se présente
(...)		

12. La mention « Si le cas se présente » dans le tableau ci-dessus indique que dans le cadre des essais en conditions réelles, il ne serait pas prévu d'évaluer la prescription de sécurité visée. Cette évaluation aurait toutefois lieu dans le cas où la situation correspondante se présenterait.

¹⁰ Comme exposé dans le document de travail VMAD-18-03.

Certaines situations sont clairement indésirables sur la voie publique par souci de sécurité. Néanmoins, sachant que des situations imprévues se produisent durant les essais en conditions réelles, lesdites situations pourraient être admises, auquel cas il conviendrait d'évaluer les réactions du système par rapport à la prescription. La sécurité du déroulement des essais devrait également être prise en compte. L'évaluateur ou le conducteur en seraient responsables, ce qui devrait les amener à reprendre le contrôle de la tâche de conduite si nécessaire.

13. Le sous-groupe 4 du groupe VMAD se prononcera ultérieurement sur la façon d'inclure les situations du type « Si le cas se présente » dans la méthode applicable aux essais en conditions réelles. Faudrait-il les introduire dans la matrice d'essai, ou bien devrait-on rédiger des instructions, s'appliquant aux protocoles d'essai, pour expliquer aux évaluateurs comment les gérer ?

14. En outre, à la place des mentions « Oui » et « Si le cas se présente », le tableau pourrait fournir davantage d'informations sur la finalité de l'essai, comme dans l'exemple ci-dessous :

Tableau 2

Exemple d'une autre structure pour la matrice générale des essais physiques

<i>Prescription de sécurité (FRAV)</i>	<i>Essais sur piste</i>	<i>Essais en conditions réelles</i>
XX. Le système de conduite automatisé devrait réagir en toute sécurité à une queue de poisson.	Examen de la réaction du système de conduite automatisé dans le cas où il faut éviter une collision à la suite d'une queue de poisson.	Examen visant à vérifier si le système de conduite automatisé corrige la position du véhicule en réaction à la queue de poisson. Examen de la réaction du système de conduite automatisé dans le cas où il faut éviter une collision à la suite d'une queue de poisson, si ce cas se présente.

B. Matrice pour les essais sur piste

15. La colonne de gauche de la matrice pour les essais sur piste ferait référence aux scénarios élaborés par le sous-groupe 1 du groupe VMAD, lesquels, selon les prévisions du sous-groupe 4, indiqueraient l'état de la circulation, les éléments d'infrastructure, les objets, les éléments du domaine de conception fonctionnelle, etc.

16. La colonne des prescriptions de sécurité ferait référence aux prescriptions applicables, qui auraient été établies par le groupe FRAV et qui seraient évaluées dans le scénario considéré. Selon les prévisions du sous-groupe 4 du groupe VMAD, le groupe FRAV fournirait des prescriptions permettant de déterminer les critères de réussite, lesquels seraient à leur tour présentés dans la colonne des critères de l'évaluation.

17. La colonne des spécifications d'essai supplémentaires permettrait de mentionner des conditions ou des paramètres supplémentaires qui n'auraient pas été ou pas pu être décrits dans le scénario de circulation ou dans les prescriptions de sécurité, mais qui seraient nécessaires pour réaliser l'essai sur piste (la durée minimale de l'essai, par exemple).

18. Il convient de noter que l'exemple de matrice ci-dessous n'est qu'une illustration de la structure envisagée. Ainsi, les mentions sont volontairement générales et ne devraient pas être considérées comme une expression de la position du groupe VMAD s'agissant de la pertinence des essais sur piste pour évaluer les prescriptions de sécurité visées.

19. Les scénarios, les prescriptions de sécurité et les critères d'évaluation doivent être fournis par le sous-groupe 1 du groupe VMAD et le FRAV. Les éventuelles spécifications d'essai supplémentaires doivent quant à elles résulter de débats au sein du sous-groupe 4 du VMAD.

Tableau 3
Exemple de matrice pour des essais sur piste

<i>Scénario de circulation</i>	<i>Prescriptions de sécurité</i>	<i>Spécifications d'essai supplémentaires</i>	<i>Critères d'évaluation</i>
Cette colonne ferait référence au scénario sur lequel l'essai est fondé. Selon les prévisions du sous-groupe 4 du groupe VMAD, les scénarios indiqueraient l'état de la circulation, les éléments d'infrastructure, les objets, les éléments du domaine de conception fonctionnelle, etc.	Cette colonne ferait référence aux prescriptions de sécurité pertinentes pour le scénario de circulation visé. Selon les prévisions du sous-groupe 4 du groupe VMAD, le groupe FRAV fournirait des prescriptions permettant de déterminer les critères de réussite, lesquels seraient à leur tour présentés dans la colonne des critères de l'évaluation.	Cette colonne servirait à compléter la description du scénario de circulation par des informations ou des paramètres requis en vue de réaliser l'essai sur piste (éventuellement).	Cette colonne présenterait les critères de l'évaluation.
Les exemples ci-dessous illustrent l'objet de la matrice pour les essais sur piste. Ces exemples sont délibérément communs, conformément au souhait du sous-groupe 4 du groupe VMAD. Les scénarios et les prescriptions de sécurité seraient fournis par le sous-groupe 1 du groupe VMAD et le FRAV. La matrice évoluerait en fonction de l'avancement des activités.			
Déplacement sans obstacles en ligne droite	Positionnement latéral sûr dans une voie de circulation	L'essai dure 5 minutes au minimum	Cet essai doit démontrer que le véhicule équipé du système de conduite automatisé ne quitte pas sa voie et garde une position stable à l'intérieur de celle-ci sur toute la plage des vitesses inscrites dans les limites du système.
Déplacement sans obstacles dans une courbe	Positionnement latéral sûr dans une voie de circulation Adaptation à l'état de la route	L'essai dure 5 minutes au minimum	Cet essai doit démontrer que le véhicule équipé du système de conduite automatisé ne quitte pas sa voie et garde une position stable à l'intérieur de celle-ci sur toute la plage des vitesses et des courbures inscrites dans les limites du système.

<i>Scénario de circulation</i>	<i>Prescriptions de sécurité</i>	<i>Spécifications d'essai supplémentaires</i>	<i>Critères d'évaluation</i>
Queue de poisson d'un autre véhicule sur une ligne droite	Réagir à la queue de poisson en toute sécurité Positionnement longitudinal sûr par rapport au véhicule aval	Scénario comportant certains paramètres sélectionnés, visant à tester l'évitement par le système de conduite automatisé d'une collision à la suite d'une queue de poisson dangereuse, conformément aux prescriptions de sécurité ¹¹	Cet essai doit démontrer que le véhicule équipé du système de conduite automatisé est capable, jusqu'à un certain point, d'éviter une collision avec un véhicule qui lui fait une queue de poisson.
Scénario de sortie du domaine de conception fonctionnelle	Détection par le système de conduite automatisé des limites du domaine de conception fonctionnelle Réaction automatisée (en cas de non-réaction de l'utilisateur de secours ou d'absence de réaction si ce dernier n'existe pas)	Essai portant sur la non-réaction de l'utilisateur de secours	L'essai doit démontrer que le système de conduite automatisé est capable d'arrêter le véhicule en toute sécurité en cas de non-réaction de l'utilisateur de secours.

¹¹ Cette mention laisse entendre que le scénario de circulation ne prévoit pas de situation critique sur le plan de la sécurité (et les paramètres correspondants à sélectionner). Si cette situation devait être prévue dans le scénario, cette case du tableau pourrait être vide.

C. Matrice pour les essais en conditions réelles

20. Dans les colonnes de gauche de la matrice pour les essais en conditions réelles figureraient les prescriptions de sécurité que le groupe FRAV établirait et permettrait d'évaluer.

21. Les rangées supérieures à droite présenteraient les situations de circulation à reproduire durant les essais en conditions réelles. Du fait de la nature dynamique de la circulation en conditions réelles, il semble peu probable que les situations de circulation se produisent telles que décrites dans les scénarios élaborés par le sous-groupe 1 du groupe VMAD, si bien qu'il n'est pas fait référence à ces scénarios dans la matrice. Les situations de circulation présentées dans la deuxième rangée seraient décrites dans les protocoles d'essai accompagnant la matrice, cette description devant être plutôt générale de sorte qu'on ait quasiment la certitude de la rencontrer durant les essais en conditions réelles. Afin d'éviter toute confusion avec les « scénarios de circulation » mis au point par le sous-groupe 1 du groupe VMAD, on parle (provisoirement) de « situations de circulation »¹².

22. Il convient de noter que les cinq situations de circulation présentées dans l'exemple ci-après sont de simples illustrations.

23. Dans les autres cellules de la matrice figurent les critères d'évaluation selon les prescriptions de sécurité correspondant aux situations de circulation applicables, lesquels doivent être fournis par le groupe FRAV. Les critères d'évaluation devraient résumer ce qui est attendu en une seule phrase, une présentation plus détaillée desdits critères devant être fournie dans les protocoles d'essai accompagnant la matrice le cas échéant.

24. La présence de critères d'évaluation indique que la prescription de sécurité visée doit faire l'objet d'un examen pour la situation de circulation correspondante. À titre d'illustration, dans la rangée 1.1 du tableau ci-après, la conformité à la prescription de maintien du véhicule dans sa voie de circulation devrait être vérifiée dans toutes les situations de circulation. (On notera que les critères d'évaluation présentés dans le tableau ci-après sont de simples exemples. En outre, ils ne rendent pas compte de la position du groupe VMAD quant à la nécessité de contrôler la conformité à la prescription de sécurité visée dans les situations de circulation pour lesquelles les critères sont fournis.)

25. Comme indiqué précédemment, le sous-groupe 4 du VMAD continuera d'étudier la possibilité de prendre en compte dans la matrice les situations du type « Si le cas se présente ». Celles-ci entrent dans deux catégories : la première englobe les situations qu'il n'est pas souhaitable de tester sur la voie publique, bien qu'elles puissent se produire¹³ ; la seconde correspond aux situations (dans des conditions de circulation normales) que l'on n'est pas certain de rencontrer en conditions réelles (de sorte qu'on ne peut pas en imposer l'évaluation), mais qui peuvent avoir lieu.

26. À titre d'illustration pour la première catégorie, voir l'exemple de la rangée 2.1 du tableau ci-après (Réagir à une queue de poisson en toute sécurité). Il s'agit en l'occurrence de tester la réaction du système de conduite automatisé à la queue de poisson d'un autre véhicule, en conditions réelles. Cette réaction à une situation dangereuse ne pourrait être testée que dans le cas où elle se présenterait durant l'essai en conditions réelles, comme indiqué par l'ajout de la mention « le cas échéant ».

27. À titre d'illustration pour la seconde catégorie, voir aussi l'exemple de la rangée 2.1 du tableau ci-après (Réagir à une queue de poisson en toute sécurité). La queue de poisson dont il est question peut se produire dans l'une quelconque des situations de circulation

¹² Si le sous-groupe 1 du groupe VMAD venait à élaborer des scénarios généraux applicables à la matrice conçue pour les essais en conditions réelles, le sous-groupe 4 y ferait alors référence.

¹³ L'évaluateur devrait pouvoir interrompre un essai sur la voie publique dans le cas où la situation devient dangereuse. Le sous-groupe 4 du VMAD continuera à examiner cette question et pourrait décider d'introduire des recommandations dans les protocoles d'essai.

mentionnées en haut du tableau, mais cela n'est pas certain. Si elle se produit, il convient d'évaluer la réaction du système de conduite automatisé.

28. Dans les deux cas, le sous-groupe 4 du VMAD déterminera la manière la plus pratique et la plus claire de décrire les situations du type « Si le cas se présente ». Les suggestions qui ont été faites jusqu'à présent sont les suivantes :

a) Traiter ces situations à part (par exemple, fournir des conseils ou des orientations dans les protocoles d'essai uniquement) ;

b) Les inclure dans la matrice en signalant certaines conditions (par exemple, voir la rangée 2.2 dans le tableau ci-après ; on notera en particulier la situation du changement de voie, qui requiert une évaluation à condition que le cas se présente) ;

c) Signaler les situations du type « Si le cas se présente » (au moyen d'un astérisque, par exemple) et introduire les critères d'évaluation, ainsi que des conseils ou des orientations, dans les protocoles d'essai. (Cette troisième option n'est pas illustrée dans le tableau ci-après).

29. Les conditions telles que la durée minimale de l'essai ou la fréquence minimale d'une situation de circulation donnée durant un essai seraient énumérées dans les protocoles d'essai.

Tableau 4
Exemple de matrice pour des essais en conditions réelles : conduite sur autoroute

Prescriptions de sécurité	Situations de circulation					
	Conduite sur autoroute	Insertion	Changement de voie	Dépassement	Sortie d'autoroute	
1.1 Positionner le véhicule en toute sécurité dans une voie de circulation	Cet essai doit démontrer que le véhicule équipé du système de conduite automatisé ne quitte pas sa voie et garde une position stable à l'intérieur de celle-ci sur toute la plage des vitesses inscrites dans les limites du système.	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule se trouve dans une position stable à l'intérieur de la voie de circulation cible à la fin de la procédure de changement de voie.	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule se trouve dans une position stable à l'intérieur de la voie de circulation cible à la fin de la procédure de changement de voie.	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule se trouve dans une position stable à l'intérieur de la voie de circulation cible à la fin de la procédure de changement de voie.	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule se trouve dans une position stable à l'intérieur de la voie de circulation cible à la fin de la procédure de changement de voie.	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule se trouve dans une position stable dans la voie de sortie de l'autoroute.
2.1 Réagir à une queue de poisson en toute sécurité	Le système de conduite automatisé adapte la position du véhicule en réaction à la queue de poisson. Le système de conduite automatisé réagit de façon appropriée ¹⁴ à une queue de poisson dangereuse, le cas échéant ¹⁵ .					

¹⁴ La réaction « appropriée » serait alors définie dans les protocoles d'essai accompagnant la matrice (source : groupe FRAV).

¹⁵ Il convient de déterminer si les situations du type « Si le cas se présente » devraient être mentionnées dans la matrice elle-même. Elles le sont ici, comme dans d'autres parties du tableau, à titre d'illustration.

<i>Prescriptions de sécurité</i>	<i>Situations de circulation</i>				
	<i>Conduite sur autoroute</i>	<i>Insertion</i>	<i>Changement de voie</i>	<i>Dépassement</i>	<i>Sortie d'autoroute</i>
2.2 Positionner le véhicule en toute sécurité par rapport au véhicule aval	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule est maintenu dans une position longitudinale sûre par rapport au véhicule aval.	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule est maintenu dans une position longitudinale sûre par rapport au véhicule aval pendant et après la procédure de changement de voie.	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule est maintenu dans une position longitudinale sûre par rapport au véhicule aval avant et pendant la procédure de changement de voie. Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule est maintenu dans une position longitudinale sûre par rapport au véhicule aval après la procédure de changement de voie, le cas échéant.	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule est maintenu dans une position longitudinale sûre par rapport au véhicule aval avant et pendant la procédure de changement de voie.	Le système de conduite automatisé démontre que le véhicule est maintenu dans une position longitudinale sûre par rapport au véhicule aval, le cas échéant.

III. Considérations et prochaines étapes

30. L'étape suivante dans l'élaboration des méthodes pour les essais sur piste et les essais en conditions réelles consiste à introduire dans les matrices d'essai les prescriptions de sécurité, les scénarios ou situations de circulation ainsi que les critères d'évaluation. Cette étape sera toutefois suivie d'autres étapes avant que l'approche de la matrice puisse être appliquée en tant que méthode d'évaluation.

31. On trouvera ci-dessous un aperçu des étapes requises à cette fin, et quelques considérations préalables.

A. Introduction de données dans la matrice

32. Pour pouvoir avancer dans l'élaboration de la méthode d'essai fondée sur une matrice, il faut en premier lieu introduire dans ladite matrice des prescriptions, des scénarios et des critères d'évaluation. En effet, la plupart des étapes suivantes, sinon toutes, dépendent en grande partie du contenu de la matrice. Par exemple, faute de savoir ce qui devrait être testé et selon quels critères, il serait difficile, voire impossible, de déterminer la durée et la portée d'un essai en conditions réelles.

33. Ainsi, la matrice serait alimentée avec les prescriptions de sécurité et les critères d'évaluation que le groupe FRAV établirait ; pour les essais sur piste, il faudrait également y introduire les scénarios élaborés par le sous-groupe 1 du groupe VMAD. Sachant que le groupe FRAV et le sous-groupe 1 du groupe VMAD continuent d'élaborer les prescriptions de sécurité et les scénarios de circulation respectivement, les travaux du sous-groupe 4 sur les matrices elles-mêmes seront largement maintenus en attente jusqu'à ce que ces prescriptions et scénarios soient disponibles.

34. S'agissant de l'introduction en temps voulu des données dans les matrices, les critères à appliquer pour les essais seraient choisis en coordination avec les groupes VMAD et FRAV, et les scénarios, en coordination avec le sous-groupe 1.

B. Élaboration des protocoles d'essai

35. Une fois que les données ont été introduites dans la matrice d'essai, le sous-groupe 4 du groupe VMAD se charge d'élaborer les protocoles d'essai¹⁶. Ces protocoles comprendraient, par exemple, la portée et la durée des essais, les conditions d'essai (dans la mesure où elles ne seraient pas décrites dans les critères ou dans les scénarios ou situations de circulation), ainsi que d'autres informations nécessaires pour que les personnes réalisant les essais puissent interpréter la matrice et les protocoles d'essai de façon uniforme, puis faire des évaluations de façon uniforme également.

C. Validation de l'approche appliquée pour les essais

36. Les matrices d'essai et les protocoles d'essai qui les accompagnent devraient d'abord faire l'objet d'une validation au cours d'une phase de démonstration. On pourrait ainsi apporter la preuve qu'ils produisent bien l'évaluation requise en ce qui concerne la sécurité des véhicules équipés d'un système de conduite automatisé. Cette validation est d'autant plus importante pour les essais en conditions réelles qu'il n'existe actuellement aucun cadre réglementaire, aucune procédure ni aucune spécification permettant d'évaluer la sécurité d'un système de conduite automatisé.

¹⁶ Parmi les paramètres d'essai devrait figurer le domaine de conception fonctionnelle associé au système de conduite automatisé à l'essai.

37. Lorsque les matrices d'essai et les protocoles d'essai correspondants (sous forme de projets convenables) auront été élaborés, le processus de validation proprement dit sera conçu. Un certain nombre de questions devront alors être examinées, notamment les suivantes :

- a) Combien de configurations d'essai et de véhicules d'essai sont nécessaires ?
 - b) Combien de fois les matrices d'essai et les protocoles d'essai doivent-ils être soumis à l'épreuve de la validation ?
 - c) Qui est chargé de l'épreuve de validation des matrices d'essai et des protocoles d'essai ?
 - d) Combien de pays doivent valider les matrices d'essai et les protocoles d'essai ?
 - e) Chaque pays devrait-il organiser sa propre épreuve de validation des matrices d'essai et des protocoles d'essai ?
-