



CVH – Chaîne outillée pour l’Homologation de Véhicules automatisés

CVH – Simulation Platform for Automated Vehicles

NIOL Julien
IRT SystemX et
AIRBUS Protect
Elancourt
julien.niol@airbus.com

HONNET Vincent
IRT System X
Palaiseau
vincent.honnet@irt-systemx.fr

BOHN Christophe
IRT System X
Palaiseau
christophe.bohn@irt-systemx.fr

Résumé — L’intégration de systèmes de conduite automatisée, ou ADS (Automated Driving Systems), au sein de la circulation ne peut se faire sans garantir des performances de sécurité au moins équivalente à une conduite humaine et l’absence d’accidents raisonnablement prévisibles et évitables. La vérification de ces propriétés exige de tester le système dans un grand nombre de situations pour en couvrir le maximum. Le recours à la simulation, permettant de décliner rapidement et sans danger des scénarios multiples et variés, est envisagé. Cependant, celle-ci se doit d’apporter une preuve de sa crédibilité et de sa capacité à être suffisamment représentative du comportement réel du système, une opération désignée par « credibility assessment » dans la réglementation. Au sein de l’IRT SystemX, le projet CVH a été monté pour apporter des réponses à cette problématique, dans la continuité des précédents travaux sur l’utilisation de la simulation pour la validation. Le projet s’articule autour de deux tâches principales, la génération de plan de tests optimisés et couvrants à partir de la spécification du système et l’amélioration de la représentativité de la simulation par la production de modèles de capteur dits « phénoménologiques bruités » intégrant l’influence des perturbations environnementales sur les capteurs ainsi que les métriques de corrélation associées pour vérifier la cohérence du modèle avec le phénomène réel caractérisé. Ces deux tâches contribuent à supporter la validation d’un ADS et à apporter des preuves de confiance lors de l’audit de son dossier de sécurité, à la fois dans l’emploi des « bons scénarios » permettant de couvrir les situations rencontrées en pratique et l’emploi de « scénarios bons », suffisamment représentatifs pour transposer les résultats de simulation à la réalité.

Mots-clefs — système de transport routier automatisé, validation, simulation, scénarios, capteurs

Abstract — ADS (Automated Driving Systems) integration inside current traffic cannot be done without guaranteeing safety performances at least equivalent to human driving and the absence of reasonably foreseeable and preventable accidents. The verification of these properties requires testing the system in a high number of situations for a maximum coverage. The use of simulation is considered, in its capability to perform rapidly and without danger a high number of various scenarios. However, the simulation has to demonstrate its credibility and its capability to be sufficiently representative of the system real behavior. That feature has been introduced as “credibility assessment” in regulation. Inside IRT SystemX, CVH project has been launched to address that issue, in the continuity of former work on the use of simulation for ADS validation. The project is organized around two main tasks. The first one is the generation of test plans from the system specification that are optimized with a maximum coverage. The second one is the improvement of simulation representativeness producing sensor models called “noisy phenomenological” which are integrating the influence of environmental disturbances on sensors. Correlation metrics are also evaluated to verify model consistency towards the real phenomenon characterized. Both tasks are contributing to support ADS validation and to give confidence for the audit of the safety assessment. The project contributes to the use of the “right scenarios” covering situations potentially faced on the road and the use of “scenarios right” sufficiently representative to transpose results proved in simulation to real situations the system may encounter.

Keywords — automated driving system, validation, simulation, scenarios, sensors

I. INTRODUCTION

L’introduction de véhicules automatisés connectés, ou ADS (Automated Driving Systems) au sein d’une circulation majoritairement composée de conducteurs humains ne peut se faire qu’à la condition de conserver un niveau de sécurité globalement au moins équivalent au niveau actuel et d’éviter la survenue d’accidents raisonnablement prévisibles du fait du véhicule automatisé. La réglementation européenne énonce ainsi un premier objectif chiffré de l’ordre de 10^{-7} accidents/h (Commission Européenne, 2022). Les systèmes automatisés présentent des modules de prise de décision. Ceux-ci sont susceptibles d’adopter un comportement non pertinent selon la situation rencontrée. La gestion du risque accidentel ne peut plus se résumer au calcul d’un taux de fiabilité global basé sur les défaillances individuelles de chaque composant, selon leurs effets. Une approche quantitative de démonstration de cet objectif exigerait alors de parcourir des milliards de kilomètres pour obtenir un résultat statistiquement représentatif. Cela resterait toutefois insuffisant pour s’assurer de s’être trouvé en présence d’un

40 nombre suffisant de situations dangereuses. Ainsi, le recours à la simulation est envisagé pour mettre le véhicule en situation, en
41 particulier dans les plus dangereuses, afin de pouvoir évaluer le risque de manière globale sur l'ensemble des situations. L'usage
42 de la simulation se heurte cependant au problème de la crédibilité, à la fois dans la sélection des scénarios injectés en simulation
43 que dans la performance des modèles de simulations.

44 Le projet CVH (Chaîne outillée pour la Validation et l'Homologation des véhicules automatisés connectés) ambitionne de
45 traiter ces deux volets et les difficultés associées. D'une part, le projet souhaite spécifier un prototype de chaîne outillée,
46 permettant la génération d'un plan de test le plus couvrant par rapport à la spécification d'un véhicule automatisé. Il s'agit ici
47 d'identifier les éléments caractéristiques du système à valider et de sélectionner les scénarios les plus pertinents dans un plan
48 conservant une taille optimale. Le plan de test ne doit pas se limiter à une génération combinatoire multipliant les scénarios
49 similaires sans oublier d'inclure tous les paramètres représentatifs. La méthodologie de sélection et de mise en correspondance
50 des scénarios au regard de la spécification constitue le verrou principal de cette activité. L'objectif de cette chaîne, outre la
51 génération du plan de test est aussi de permettre l'audit du processus de génération en apportant des preuves de confiance dans
52 celui-ci. D'autre part, l'ambition est d'améliorer les modèles de simulation, notamment ceux des capteurs de perception qui
53 constituent un enjeu critique de représentativité et permettent la prise en compte de l'influence des phénomènes
54 environnementaux sur la performance des capteurs. Le projet ambitionne ici de construire des modèles dits « phénoménologiques
55 bruités » rendant les modèles imparfaits en superposant un bruit paramétré par le phénomène auquel le capteur est confronté, et
56 reproduisant ainsi les erreurs de mesure qui peuvent être faites en réalité. Le projet travaille en parallèle sur les modèles de radar,
57 de lidar et de caméra. La démarche consiste à caractériser les phénomènes et leur influence sur le capteur en étudiant ceux-ci sur
58 des données réelles pour ensuite essayer de les reproduire dans un modèle tout en développant les métriques permettant de
59 mesurer la corrélation entre le phénomène modélisé et son acquisition dans la réalité. Par ces deux volets, le projet espère
60 permettre à la fois la sélection des « bons scénarios » et la simulation de « scénarios bons ».

61 Cette publication, dans un premier temps, rappelle le contexte réglementaire qui se développe autour du véhicule automatisé
62 et qui introduit la notion de « Credibility Assessment ». La section suivante consiste en un état de l'art des principaux éléments
63 ayant permis de cadrer le projet et de contribuer aux premiers travaux méthodologiques. La modélisation est détaillée dans la
64 section suivante, en distinguant les deux volets traités par le projet, sélection et génération de plan de test ainsi que la
65 représentativité de la solution. Les résultats ne seront pas encore abordés à ce stade, trop précoces pour être détaillée. La section
66 suivante se concentre sur la discussion autour des enjeux et difficultés du projet et les perspectives de résultats avant de conclure.

67

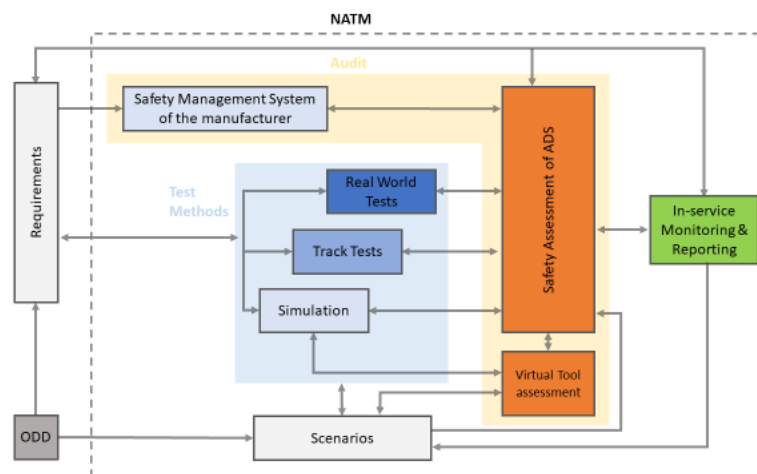
II. CONTEXTE REGLEMENTAIRE

68 La problématique de validation d'un véhicule automatisé connecté a fait l'objet d'un travail réglementaire des instances
69 internationales. Ainsi, en premier lieu, le VMAD (Validation Method for Automated Driving), groupe dédié au sujet de la
70 validation, au sein du GRVA (GRoupe de travail sur les Véhicules Automatisés connectés) et pour le compte du WP.29 (forum
71 mondial pour l'harmonisation des règlements sur les véhicules) de l'UNECE (Commission Economique Européenne pour les
72 Nations Unies) a contribué à la publication de la NATM (New Assessment Test Method), définissant les nouvelles pratiques à
73 mettre en œuvre pour la validation d'un système de conduite automatisé (ECE, 2022). La méthode s'appuie sur cinq piliers (Fig.
74 1). Trois piliers adressent les différents moyens d'essai que sont la simulation, les tests sur piste et les essais routiers, utilisés
75 de manière combinée. Le quatrième pilier relève de l'audit et de la production d'un dossier de sécurité explicitant les éléments
76 caractéristiques du système, les résultats d'analyse et les processus suivis pour son développement. Le dernier définit les éléments
77 à mettre en place pour le suivi en opération ainsi que la remontée d'information vers les autorités. Ce document est en régulière
78 évolution et constitue la base des réglementations publiées depuis. Ainsi, le règlement UN-R157 permettant l'homologation des
79 systèmes ALKS (Automated Lane Keeping System) de niveau 3 en reprend les principes (ECE, 2020). Le dernier règlement
80 européen à ce sujet, 2022/1426 surnommé ADS Act, reprend également une grande partie du texte de la NATM (Commission
81 Européenne, 2022).

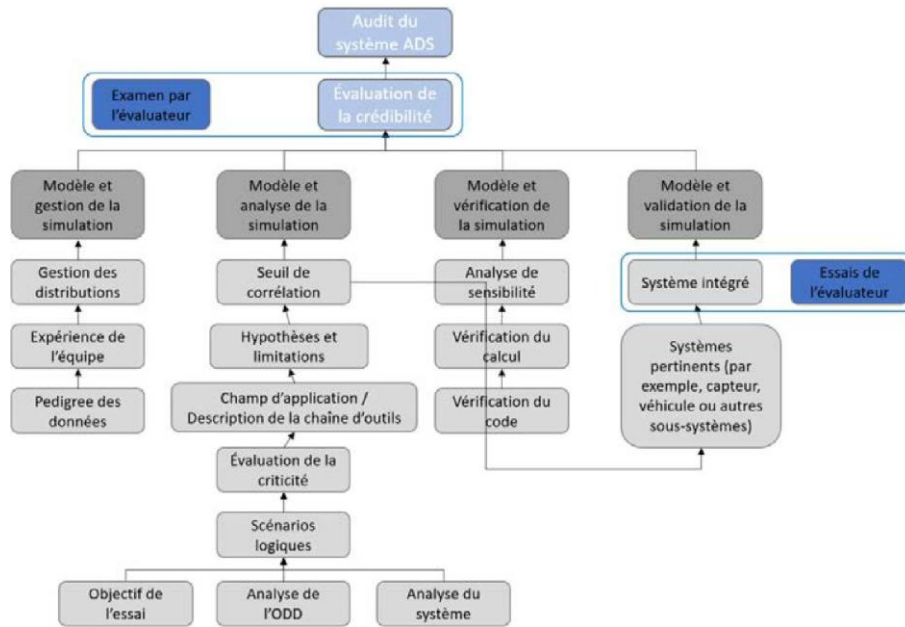
82

83 Fig. 1. Piliers de la NATM

84
85



86 la crédibilité de la simulation pour donner confiance dans les résultats. L'ADS Act propose un cadre et un enchaînement d'étapes
 87 pour évaluer la crédibilité et rendre le dossier plus facilement auditable (Fig. 2) (Commission Européenne, 2022). Il s'agit ici de
 88 faciliter le travail de l'auditeur chargé de son évaluation. La démarche proposée couvre tout le cycle de développement du produit
 89 et ne se limite à la seule exécution de la simulation. Le choix des scénarios de validation fait donc partie du processus de
 90 crédibilisation de la simulation, renvoyant à l'objectif plus global de garantir une couverture maximale des situations auxquelles
 91 le système sera confronté. L'évaluation de la crédibilité se compose également d'une évaluation de la corrélation des modèles
 92 utilisés avec la réalité des phénomènes simulés. Enfin, un process de V&V (Vérification et Validation) est également mis en
 93 place, avec la nécessité de garantir à la fois, la bonne exécution de la simulation et l'exécution de la bonne simulation avec un
 94 choix de modèles pertinents au regard du scénario envisagé.



95
 96 Fig. 2. Proposition de workflow pour le « credibility assessment »

97 III. ETAT DE L'ART

98 Le projet CVH adresse la problématique de validation d'un système automatisé grâce à la simulation. Ces problématiques
 99 sont aujourd'hui couvertes tout ou partiellement par plusieurs initiatives. Il est possible de distinguer différentes catégories
 100 constituant une source d'information importante pour le projet.

101 A. Travaux normatifs

102 Le contexte réglementaire a été précisé par les travaux à différentes échelles, aboutissant à la publication de textes
 103 internationaux par l'UNECE ou européen par la Commission Européenne. Ces textes fournissent les exigences à respecter pour
 104 tout système devant être homologué dans ce cadre. Ils incluent également en annexe diverses recommandations n'ayant pas
 105 nécessairement valeur d'exigence. Ces éléments offrent une première piste pour la mise en place des moyens de conformité aux
 106 exigences énoncés dans le corps principal du texte. Ces moyens de conformité sont régulièrement complétés par l'émission de
 107 normes issus des groupes de travail où les experts s'accordent pour standardiser ceux-ci. Ce travail est mené sur divers front. La
 108 NHTSA (National Highway Traffic Safety Association) contribue pour le marché américain à la définition de listes couvrant les
 109 principaux concepts attendus dans le dossier de sécurité, listes prenant valeur de référence (Thorn et al., 2018). L'ISO
 110 (International Organization for Standardization) travaille quant à elle, par l'intermédiaire du comité technique TC 22 sur les
 111 véhicules routiers, à la standardisation du processus de prise en compte de la sécurité de la conception à la validation, par
 112 l'intermédiaire des documents ISO TR 4804 (Technical Report) et de son successeur ISO TS 5083 (Technical Specification) en
 113 cours d'élaboration (ISO, 2020). L'organisation travaille également sur la standardisation des scénarios de test pour les systèmes
 114 automatisés par l'intermédiaire des normes ISO 34501 à 34505. La norme ISO 34503 porte notamment sur la taxonomie des
 115 ODD (Operational Design Domain) (ISO, 2023), initiative la plus récente d'un sujet ayant connu de multiples occurrences.

116 B. Travaux méthodologiques

117 Le projet CVH, par l'intermédiaire de l'IRT SystemX est en lien étroit avec l'administration française, contribuant à asseoir
 118 la position française sur ces questions. Le projet s'inscrit donc dans la continuité des travaux ayant permis de faire une première
 119 déclinaison de la réglementation à l'échelle française, adressant tout particulièrement les STRA (Système de Transport Routier
 120 Automatisé). Le projet prévoit de s'appuyer sur les documents méthodologiques émis par la DGITM (Direction Générale des
 121 Transports, des Infrastructures et des Mobilités), eux-mêmes influencés par les travaux et les démonstrations du projet SAM
 122 (Sécurité et Acceptabilité de la conduite et de la Mobilité autonome) (Brini et al., 2022). Ces guides méthodologiques ont déjà
 123 conceptualisé de nombreux éléments sur la question de l'utilisation des scénarios dans la cadre de la validation de la STRA, de

124 l'intégration des éléments de standardisation sur les principaux concepts autour de l'approche par scénarios et de l'application
125 de la méthode GAME (Globalement Au Moins Equivalent) pour l'atteinte de l'objectif global de sécurité (Ministère, 2024).

126 Des travaux similaires sont également menés à l'étranger, notamment en Allemagne, par l'intermédiaire de l'ASAM
127 (Association for Standardization of Automation and Measuring systems) et du projet PEGASUS puis VVM (Verification
128 Validation Methods) qui s'intéressent à ces questions de validation d'un système automatisé sur le plan des méthodes et outils
129 (Fischer et al., 2023). Ils ont notamment débouché sur la production d'un certain nombre de DSL (domain-specific language)
130 regroupés sous la dénomination OpenX, comme OpenScenario par exemple. Ces langages ont pour objectif de standardiser la
131 description des éléments nécessaires au processus de validation, comme l'ODD ou les scénarios.

132 C. Travaux d'outillage

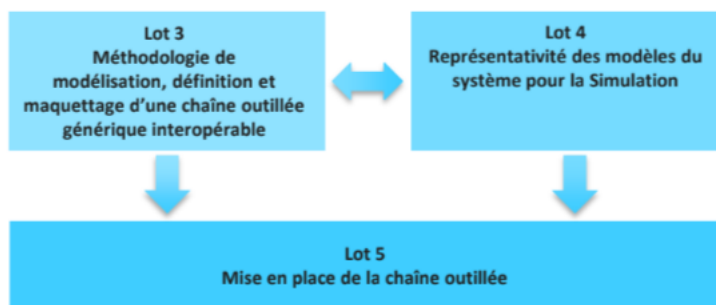
133 La mise en avant d'une approche par scénarios a contribué à l'émergence d'acteurs avec l'ambition d'outiller le processus.
134 Dans un premier temps, les initiatives se sont concentrées sur la définition et la création de bases de scénarios. Le projet CVH
135 s'appuie notamment sur la base MOSAR (Methods and tools for Operational Safety Assessment and Robustness analysis of
136 autonomous vehicles), développée au sein de l'IRT SystemX pour permettre la capitalisation de différentes sources de scénarios,
137 principalement issus de l'accidentologie ou de roulages (Revert, 2023). Celle-ci est complétée par l'initiative ADScene, visant à
138 industrialiser la base MOSAR. La notion de « bien commun » et de base de scénarios de référence se développe également
139 ailleurs. Il s'agit de l'ambition de l'initiative SafetyPool, supportée par l'Université de Warwick (<https://www.safetypool.ai/>).
140 D'autres éditeurs se positionnent sur un enjeu similaire à ce que la chaîne outillée CVH souhaite adresser, à savoir permettre la
141 génération de cas de test à partir de scénarios de référence et d'éléments de spécification en entrée. AVL met en avant cette
142 fonctionnalité par l'intermédiaire de Scenius, au sein de son catalogue d'outils (AVL, s.d.).

143 D. Travaux antérieurs

144 Enfin, le projet CVH s'inscrit dans la continuité des précédents projets menés à l'IRT SystemX, SVA (Simulation pour la
145 sécurité du Véhicule Autonome), de 2015 à 2019, et 3SA (Simulation pour la Sécurité des Systèmes du véhicule Autonome), de
146 2019 à 2023, sur la question de l'utilisation de la simulation pour la validation d'un système automatisé. Les précédents projets
147 ont permis notamment d'aboutir à la création de la base de données MOSAR (Brini, et al., 2020), à l'exploration de méthodes
148 formelles pour la question de génération de scénarios (Bannour et al., 2021), (Crisafulli et al., 2023), à l'initialisation des premiers
149 modèles et méthodologies de caractérisation de capteurs (Palmier et al., 2022) et à la définition de métriques de dangerosité au
150 sein des scénarios (Mezali et al., 2022), (Martin et al., 2022).

151 IV. METHODOLOGIE

152 Le projet CVH a pour objectif de définir une proposition de chaîne outillée venant supporter le processus de validation d'un
153 système de conduite automatisé par l'usage de la simulation. Le projet s'articule autour de deux lots principaux (Fig. 3). Le
154 premier lot, lot 3, se concentre sur un workflow de génération d'un plan de test, en sélectionnant parmi une base de référence,
155 les scénarios pertinents au regard de la spécification du système pour les transformer en scénarios de test. Le deuxième lot, lot 4,
156 se concentre sur l'amélioration des modèles utilisés en simulation, plus particulièrement les modèles de capteurs, dans le but de
157 pouvoir simuler des phénomènes physiques plus fins et plus réalistes et pouvoir évaluer les performances du système sous test
158 dans ce contexte. Les lots principaux sont supportés par un troisième lot, lot 5, consistant en la réalisation d'une preuve de concept
159 de la chaîne outillée proposée, sur un système mis à disposition par Renault, partenaire du projet



160
161 Fig. 3. Articulation des principaux lots du projet

162 A. Volet 1 (lot 3) : Génération de scénarios

163 Ce premier volet du projet se concentre sur la problématique de la génération de scénarios à tester, principalement en
164 simulation. Il couvre ainsi une branche de l'évaluation de la crédibilité consistant à fournir les bons scénarios. La chaîne outillée
165 définit dans sa proposition d'implémentation, plusieurs étapes de traitement (Fig. 4). Elle prend en données d'entrée, une base
166 de scénarios de référence, ainsi que la spécification du système. Elle fournit en sortie un plan de test, composé des scénarios
167 concrets générés, accompagnés du critère de recette du test et d'une évaluation de la couverture de ce plan de test au regard des
168 composants de la spécification.

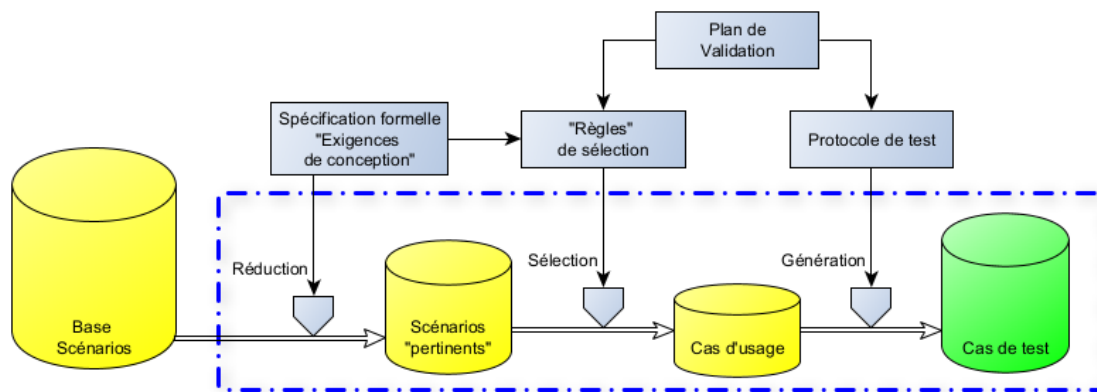


Fig. 4. Représentation des étapes de la chaîne outillée (encadrée en bleu) et de leurs entrées

La première étape de la chaîne outillée consiste à traiter les éléments d'entrée pour les formater dans une structure et un langage interprétable pour permettre un traitement outillé ultérieur. Les données d'entrée concernées sont les éléments de spécification du système. Ceux-ci permettent de définir les exigences que le système doit satisfaire pour répondre au besoin initialement émis. Ces éléments peuvent être capitalisés sous différentes formes. Le projet a principalement distingué :

- l'ODD (Operational Design Domain) définissant les configurations dans lesquelles le bon fonctionnement du système est garanti par son concepteur ;
- le TOD (Target Operational Domain), définissant l'environnement auquel le système sera vraisemblablement confronté sur le parcours ou dans la zone où il devra évoluer ;
- la DDT (Dynamic Driving Task) définissant les manœuvres que le système peut exécuter et la réalisation du contrôle de celles-ci ;
- l'OEDR (Object Event Detection and Response) définissant les réponses apportées par le système lors de la détection d'un aléa externe venant perturber l'exécution de sa fonction nominale ;
- la DDT Fallback (ou stratégie de repli) définissant le comportement de repli mis en place par le système pour rejoindre un état sûr en cas de défaillance ou d'insuffisance fonctionnelle limitant ses capacités de fonctionnement ;
- les exigences émises dans le cadre des analyses de risques telles que la sûreté de fonctionnement ou la SOTIF (Safety Of The Intended Functionality) sont également considérées comme élément de spécification

L'ensemble de ces éléments alimente une première étape de réduction de la base de scénario de référence pour ne retenir que les scénarios pertinents au regard de la spécification du système. Il s'agit dans cette étape de ne filtrer que les scénarios en écartant les scénarios irréalistes, qui contiennent par exemple des configurations qu'il ne pourra pas rencontrer, des situations qu'il ne pourra pas gérer ou des manœuvres qu'il ne pourra pas réaliser.

L'étape suivante consiste à sélectionner les scénarios qui répondent à la spécification du système et présentent un comportement attendu du système au regard des exigences. Les scénarios ainsi sélectionnés deviennent des cas d'usage au sens où ils contiennent le scénario et la réponse attendue du système à ce scénario. Le processus de développement d'un système de conduite automatisé ne diffère pas du cycle en V usuel de l'ingénierie système. La phase de conception représentant la partie descendante du V a permis de dériver les exigences répondant au besoin émis. Ces exigences sont ensuite vérifiées et validées dans la partie montante. La validation des exigences s'accompagne d'un plan de validation qui définit les objectifs de validation et les différents cas à envisager pour couvrir toute l'exigence. La formalisation de ce plan de validation définit ainsi les règles que le scénario doit respecter, règles qui seront utilisées pour permettre la sélection des cas d'usage tels que définis précédemment. Ces cas d'usage sont portés par des scénarios logiques, définissant des intervalles de paramètre qui représentent le découpage des différents cas à envisager pour permettre une évaluation complète de l'exigence.

Le passage au cas de test se fait dans une troisième étape. Afin de permettre la réalisation effective du test, il est nécessaire d'instancier le scénario logique en scénario concret. L'intervalle du paramètre se transforme en une valeur concrète que l'on peut injecter en un scénario de test. Le choix d'une valeur concrète ne se fait pas au hasard mais dépend d'un protocole de test défini dans la continuité du plan de validation. Celui-ci permet d'orienter la génération suivant différentes méthodes, par exemple, en choisissant une valeur de paramètre représentant le pire cas ou en échantillonnant les valeurs au sein de l'intervalle avec un pas régulier ou par l'intermédiaire d'une distribution de valeurs. L'objectif de cette génération est toutefois de découper l'espace représenté par le scénario logique portant le cas d'usage en un nombre minimal et suffisant de cas de test pour couvrir toutes les réactions possibles du système par rapport à l'objectif de test attendu.

Le plan de test obtenu se veut le plus optimal possible pour répondre à la problématique de crédibilité de la simulation en rapport à l'utilisation des bons scénarios. L'objectif est de couvrir le maximum de situations que le système pourrait rencontrer en pratique afin d'évaluer globalement le risque qu'il représente. Cette couverture passe par un calcul à chaque niveau de transformation, la chaîne outillée devant fournir des éléments de couverture permettant d'évaluer à la fois :

- 213 • la couverture des cas de test générés au regard d'un cas d'usage ;
- 214 • la couverture des cas d'usage sélectionnés au regard des exigences à valider ;
- 215 • la couverture des scénarios filtrés au regard des éléments de spécification ;

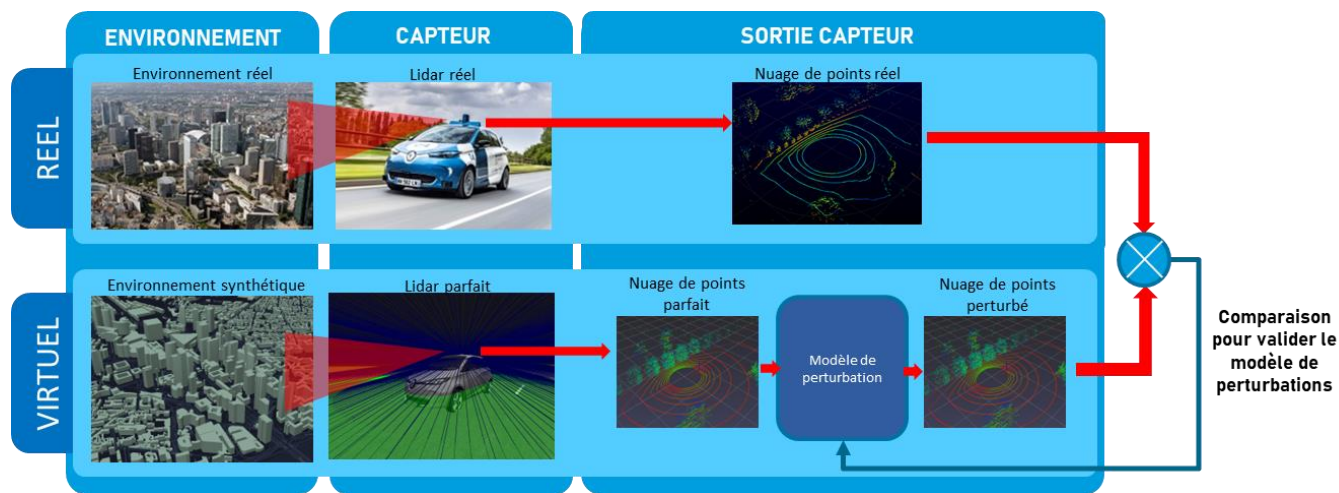
216 Ces différents niveaux de couverture permettront de donner confiance dans l'exhaustivité du plan de test au regard des
 217 situations que le système pourrait rencontrer en pratique. Ces situations sont définies dans la spécification ou peuvent être
 218 contenues dans des exigences réglementaire, par exemple en ce qui concerne les situations d'accident. Le process peut également
 219 être itératif permettant de déceler les scénarios manquants pour couvrir certaines configurations et contribuer à l'étoffement de
 220 la base de référence puis ultérieurement du plan de test. Par opposition, le calcul de la couverture permet aussi de dimensionner
 221 le plan de test au plus juste en évitant de multiplier les tests de scénarios répondant à des situations déjà évaluées.

222 B. Volet 2 (Lot 4) : Représentativité de la simulation

223 Les projets antérieurs à CVH (SVA puis 3SA) ont été axés sur l'emploi de la simulation pour la validation d'un système de
 224 conduite automatisé. La simulation s'entend ici au sens de simulation multi-physique, reposant sur un simulateur essayant de
 225 reproduire au plus proche la physique du véhicule et de son environnement. Le simulateur utilisé ici est SCANer, développé par
 226 AVSimulation. Celui-ci permet de jouer un scénario en instanciant l'environnement autour du véhicule, le décor et les acteurs
 227 en mouvement et de simuler le comportement du véhicule sous test dans cet environnement en s'interfaçant à son modèle de
 228 commande, celui-ci pouvant être le système physique ou son modèle fonctionnel. Le logiciel de simulation intègre également la
 229 possibilité de simuler les capteurs si le système de perception ne fait pas partie du protocole de test.

230 La performance de ces outils de simulation est plutôt bonne en ce qui concerne le modèle physique du véhicule ou
 231 l'intégration d'acteurs dynamiques mais reste largement améliorable en ce qui concerne la modélisation des capteurs. Les
 232 modèles employés sont bien souvent des modèles fonctionnels trop parfaits qui ne tiennent pas compte de toute la finesse des
 233 phénomènes physiques mis en jeu. Ces modèles peuvent suffire pour une validation fonctionnelle de haut niveau ou sur des tests
 234 n'impliquant pas la performance des fonctions de perception. Ils sont cependant trop limités dès lors que la perception est évaluée.
 235 Celle-ci est une fonction centrale, soumise à de nombreuses perturbations potentielles susceptibles de déclencher une insuffisance
 236 fonctionnelle et de mener à une situation de danger. Il apparaît dès lors très important de pouvoir la tester face à un ensemble de
 237 situations les plus représentatives possibles de la réalité.

238 Le projet CVH ambitionne de produire des modèles dits « phénoménologiques bruités ». Ces modèles correspondent à des
 239 modèles fonctionnels parfaits rendus imparfaits en superposant un bruit aux données mesurées. Ce bruit est paramétré selon le
 240 phénomène étudié. Concernant les perturbations atmosphériques, pour un lidar par exemple, le bruitage de la mesure sera
 241 différent selon que le capteur soit confronté à de la pluie et du brouillard. De même, l'intensité du phénomène produira un
 242 bruitage différent. L'enjeu consiste donc à établir une bonne corrélation entre un paramètre représentatif du phénomène
 243 perturbateur et de son intensité et le niveau de bruit à appliquer sur la mesure idéale. La méthode de travail s'appuie à la fois sur
 244 des comparaisons entre données réelles pour caractériser les phénomènes et des comparaisons entre données réelles et simulées
 245 pour vérifier la bonne implémentation du modèle bruité (Fig. 5).



246
 247 Fig. 5. Méthodologie appliquée sur l'exemple du lidar

248 Ce travail est mené en parallèle sur les capteurs de type caméra, lidar et radar. Ces capteurs mettant en jeu des phénomènes
 249 physiques différents, les protocoles sont adaptés à chacun. Les comparaisons des données relevées par la caméra s'appuient sur
 250 des essais effectués sur la piste de l'UTAC (Union Technique de l'Automobile du motorcycle et du Cycle) à Montlhéry. Celles-ci
 251 sont compliquées par le fait que les mesures ne se sont pas faites en environnement contrôlée, avec la nécessité d'établir dans
 252 un premier temps la corrélation entre données réelles enregistrées et données simulées du même environnement, cette fois-ci
 253 contrôlable. Concernant le lidar, les comparaisons s'effectuent à partir d'essais effectués dans le tunnel Pavin du CEREMA
 254 (Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, la Mobilité et l'Aménagement), permettant de générer pluie et brouillard en en
 255 contrôlant les paramètres. Le radar, étant quant à lui, beaucoup plus perturbé par la nature des cibles, les premières comparaisons
 256 se concentrent d'abord sur la caractérisation des cibles avant d'envisager d'autres formes de perturbations atmosphériques.

257 La production de ces modèles est fortement dépendante du matériel utilisé, tant pour l'acquisition que pour le logiciel de
258 traitement des données. Il sera de prime abord difficile de les réutiliser directement pour tout autre capteur. Au-delà du modèle
259 en lui-même, le travail porte également sur la méthodologie de caractérisation des capteurs et sur les métriques évaluant la
260 corrélation. Ces éléments permettront ainsi de transposer le travail à d'autres matériels si nécessaire. Le projet s'intéresse
261 également à la question de mesurer la représentativité d'un modèle de simulation dans l'objectif du « credibility assessment ».
262 Les travaux effectués sur les capteurs permettent une collaboration avec cette tâche, en disposant d'exemples concrets pour
263 appliquer les approches théoriques étudiées.

264 V. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

265 Le projet n'étant pour l'instant que dans sa première année, étant prévu pour une durée de quatre ans, il n'y a pas encore de
266 véritables résultats concrets à proposer. Cette première année de travail s'est principalement consacrée à des questions
267 méthodologiques, identifiant les solutions envisagées à travers l'état de l'art et préparant leur mise en application. La proposition
268 d'implémentation de la chaîne outillée et des modèles de capteurs devra être mise à l'épreuve dans une preuve de concept (PoC)
269 sur un système proposé par Renault, partenaire du projet. Celle-ci débutera à partir de la 3^{ème} année du projet, étant alimenté par
270 les premiers éléments, de manière progressive jusqu'à la fin du projet.

271 La preuve de concept sera importante pour évaluer la qualité de la proposition de la chaîne outillée et notamment son passage
272 d'un système théorique à un système réel. Au-delà des résultats obtenus par la chaîne outillée, la mise en œuvre de celle-ci au
273 sein du processus plus général de validation du système sera tout aussi importante. La chaîne outillée ne constitue qu'un simple
274 outil au service du processus de validation et non l'inverse. Celle-ci n'est pas une solution miracle qui à partir d'une spécification
275 trouverait le plan de test au plus juste. Il ne s'agit pas d'oublier le travail d'ingénierie système attendu pour supporter la validation.
276 Il reste toujours de la part de celle-ci à définir le plan de validation et les objectifs de test derrière chaque exigence à tester. La
277 chaîne outillée n'est qu'un outil de confiance, permettant de simplifier le travail d'identification des bons scénarios dans la masse
278 potentielle de scénarios existants et de donner une mesure de l'étendue des éléments couverts.

279 Le développement de la chaîne outillée rencontre aujourd'hui un verrou principal sur la tâche de sélection de scénarios en
280 cas d'usage. Les approches de génération de scénarios publiées récemment dans la littérature s'attardent généralement sur la
281 problématique de génération de scénarios concrets à partir des données observées ou bien encore sur l'agrégation de scénarios
282 concrets pour obtenir des scénarios logiques (Nalic et al., 2020), (Zhang et al., 2022), (Ding et al., 2023) et (Schütt et al., 2023).
283 La problématique de sélection reste peu abordée. Ceci reste néanmoins une question centrale. La crédibilité et la génération des
284 bons scénarios ne peut passer par une génération aléatoire ou une simple combinaison de paramètres pertinents individuellement,
285 au risque de ne pas couvrir tout un pan de situation ou de chercher à tester des scénarios incompatibles avec le comportement
286 attendu du système. La question de la capitalisation des scénarios dans une base de référence reste importante et non traitée dans
287 le périmètre du projet. Les approches de génération permettront potentiellement de compléter celle-ci ou d'agréger les scénarios,
288 mais l'application des bonnes règles de sélection reste une question pivot dans la mise en œuvre de la chaîne outillée.

289 Concernant la crédibilité des modèles employés en simulation, particulièrement pour les capteurs, la difficulté principale
290 réside dans la capacité à adresser la finesse et la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Les paramètres d'influence
291 sont multifactoriels et souvent imbriqués, ce qui rend plus difficile l'identification des plus pertinents d'entre eux. D'autre part,
292 les phénomènes observés peuvent être potentiellement approximés par plusieurs modèles physiques selon les conditions avec la
293 difficulté de généraliser les observations faites sur quelques cas particuliers à tout le spectre de variation du phénomène. A défaut
294 de résultats immédiatement exploitable, le travail de compréhension sur le fonctionnement des capteurs, leurs réponses aux
295 perturbations et la modélisation des phénomènes physiques sera utile pour progresser dans un domaine où l'enjeu est important.
296 L'amélioration de la capacité des modèles de simulation à prendre en compte des conditions météorologiques et autres formes
297 de perturbation de manière fine est nécessaire pour renforcer la confiance dans la tenue de l'objectif de sécurité. Celle-ci sera
298 plus faible si l'on procède à une disjonction des tests, évaluant d'une part les capacités fonctionnelles du système en simulation
299 avec un modèle de capteur parfait et d'autre part, évaluant la performance des capteurs lors d'essais de roulage en conditions
300 réelles. L'influence de la fonction de perception sur la prise de décision du système est trop importante pour décorréliser les tests
301 de validation.

302 VI. CONCLUSION

303 Le projet CVH a pour ambition la spécification d'une chaîne outillée pour la validation des véhicules automatisés connectés.
304 Cette chaîne outillée se veut générique et interopérable. Elle doit permettre d'adresser différents cas d'usage, allant d'une simple
305 aide à la conduite (ADAS) jusqu'à un système de transport routier automatisé (STRA), intégrant véhicules et infrastructure. Elle
306 ne doit pas également influencer en pratique le choix des outils en interface, notamment ceux permettant de réaliser les
307 simulations, capitaliser les scénarios ou concevoir le système. L'objectif de cette chaîne outillée est de renforcer la confiance
308 dans le processus et dans la démonstration de la tenue d'un objectif global de sécurité et de contribuer à la notion de « credibility
309 assessment » introduite dans les derniers textes réglementaires. La chaîne outillée contribue à cet objectif en proposant
310 d'implémenter des mécanismes de sélection des scénarios pertinents et de génération des cas de test associés, permettant une
311 traçabilité de tous les éléments et une exhaustivité dans le traitement des exigences fournies en entrée. L'ensemble facilite l'audit
312 du processus, à la fois par la mesure de la couverture des différents éléments et par la structuration des données pour permettre
313 un échantillonnage du plan de test sur des descripteurs perçus comme important par l'auditeur. Le projet adresse également la
314 problématique de la crédibilité des modèles de simulation, afin de définir s'ils apparaissent suffisamment représentatifs de la
315 réalité pour généraliser les résultats des tests obtenus en simulation. Celle-ci est traitée par le biais de l'amélioration des modèles
316 de capteurs, dans la création de modèles dits « phénoménologiques bruités » permettant de simuler les insuffisances des capteurs

317 selon les conditions dans lesquelles ils se trouvent. Celle-ci est également traitée sur le plan méthodologique, par la recherche de
318 métriques de corrélation des modèles par rapport à la réalité, parallèlement à la démarche expérimentale de comparaison
319 aboutissant à la création des modèles. Le projet, dans sa première année sur une durée de quatre ans, en est encore à un stade de
320 réflexion méthodologique et de proposition d'implémentation des solutions imaginées. L'ensemble de ces concepts doit encore
321 être éprouvé sur une preuve de concept qui sera déployée progressivement à partir de la troisième année du projet, sur un système
322 fourni par Renault.

323 REMERCIEMENTS

324 Ce travail a été financé par le gouvernement français dans le cadre du programme « France 2030 », à travers le projet CVH
325 de l'IRT SystemX. Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires académiques et industriels, LMF (Laboratoire des
326 Méthodes Formelles de l'Université Paris-Saclay), Airbus Protect, AVSimulation, Oktal SE, Renault, Stellantis et Valeo,
327 contribuant au projet CVH et apportant leur expertise et leur contribution technique aux différents volets du projet.

328 REFERENCES

- 329 AVL. (s. d.). AVL SCENIUS™ – Easily Managing ADAS/AS Safety Testing. Consulté le 28 mars 2024 sur [https://www.avl.com/en-fr/testing-](https://www.avl.com/en-fr/testing-solutions/automated-and-connected-mobility-testing/avl-scenius)
330 [solutions/automated-and-connected-mobility-testing/avl-scenius](https://www.avl.com/en-fr/testing-solutions/automated-and-connected-mobility-testing/avl-scenius).
- 331 Bannour, B., Niol, J., & Crisafulli, P. (2021, July). Symbolic model-based design and generation of logical scenarios for autonomous vehicles validation. In
332 2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (pp. 215-222). IEEE.
- 333 Brini, M., Arnoux, E., Foyer, B., Bresson, G., Durville, L., Gaillard, F., & Pajon, M. (2020, September). MOOVE & MOSAR Projects: a scenario library for
334 designing & validating ADS. In Driving Simulation Conference (DSC).
- 335 Brini, M., Martinez, A., & Arnoux, E. (2022, October). Nouvelle méthodologie d'analyse de risque pour des Systèmes de Transport Routiers Automatisés
336 (STRA). In Congrès Lambda Mu 23 «Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable»-23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de
337 Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques.
- 338 Commission Européenne. (2022). RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2022/1426 DE LA COMMISSION du 5 août 2022 établissant des règles relatives à
339 l'application du règlement (UE) 2019/2144 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les procédures uniformes et les spécifications techniques
340 pour la réception par type des systèmes de conduite automatisée (ADS) des véhicules entièrement automatisés.
- 341 Crisafulli, P., Taha, S., & Wolff, B. (2023). Modeling and analysing Cyber-Physical Systems in HOL-CSP. Robotics and Autonomous Systems, 170, 104549.
- 342 Ding, W., Xu, C., Arief, M., Lin, H., Li, B., & Zhao, D. (2023). A survey on safety-critical driving scenario generation—A methodological perspective. IEEE
343 Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- 344 Economic Commission for Europe. (2020). Proposal for a new UN Regulation on uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to
345 Automated Lane Keeping System (ECE/TRANS/WP.29/2020/81).
- 346 Economic Commission for Europe. (2022). New Assessment/Test Method for Automated Driving (NATM) Guidelines for Validating Automated Driving
347 System (ADS) (ECE/TRANS/WP.29/2022/58).
- 348 Fischer, M., Köster, F., & Mosebach, H. H. (2023). PEGASUS Project Family Perspective—Supporting the release of Automated Driving in Europe.
- 349 International Organization for Standardization. (2020). Road Vehicles – Safety and cybersecurity for automated driving systems –Design, verification and
350 validation (ISO Standard n°TR 4804:2020).
- 351 International Organization for Standardization. (2023). Road Vehicles – Test scenarios for automated driving systems – Specification for operational design
352 domain (ISO Standard n°34503:2023).
- 353 Martin, J., Grandjean, A., Prabakaran, S., Dibaj, B., & Soualmi, B. (2022, September). Addressing SOTIF requirement for AD/ADAS through long-drive
354 simulations. In Driving Simulation Conference.
- 355 Mezali, Y., Khaledi, M. I., Coquelin, L., Régnier, R., & Martin, J. (2022, July). Design of a new measurable approach for the qualification of the behaviour of
356 an autonomous vehicle. In 2022 European Control Conference (ECC) (pp. 867-874). IEEE.
- 357 Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2024, Mars). Transport routier automatisé et connecté : stratégie et cadre réglementaire.
358 Consulté le 28 mars 2024 sur <https://www.ecologie.gouv.fr/mobilite-routiere-automatisee-et-connectee>.
- 359 Nalic, D., Mihalj, T., Bäuml, M., Lehmann, M., Eichberger, A., & Bernsteiner, S. (2020, November). Scenario based testing of automated driving systems:
360 A literature survey. In FISITA web Congress (Vol. 10, p. 1).
- 361 Palmier, V. J., Prabakaran, S., Faucher, F., Servel, A., & Peden, A. (2022, October). Virtual modeling of an ADAS radar. In International Conference SIA
362 Vision.
- 363 Revert, E. (2023, June). MOSAR scenario manager and framework insights. In ADAS & Autonomous Vehicle Technology Conference.
- 364 Schütt, B., Ransiek, J., Braun, T., & Sax, E. (2023, June). 1001 ways of scenario generation for testing of self-driving cars: A survey. In 2023 IEEE Intelligent
365 Vehicles Symposium (IV) (pp. 1-8). IEEE.
- 366 Thorn, E., Kimmel, S. C., Chaka, M., & Hamilton, B. A. (2018). A framework for automated driving system testable cases and scenarios (No. DOT HS 812
367 623). United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration.
- 368 Zhang, X., Tao, J., Tan, K., Törngren, M., Sanchez, J. M. G., Ramli, M. R., Tao, X., Gyllenhammar, M., Wotawa, F., Mohan, N., Nica, M., & Felbinger, H.
369 (2022). Finding critical scenarios for automated driving systems: A systematic mapping study. IEEE Transactions on Software Engineering, 49(3), 991-1026.

370
371

372