

## LIVRABLE L2.4-4

# POCs d'expérimentations : Méthodologie de simulation pour la validation du véhicule autonome

(Version intermédiaire)

Version : 4.1

Date de version : 10/06/2021

Numéro Chrono : ISX-SAM-LIV-1241



Opération réalisée avec le concours des Investissements d'avenir de l'Etat confiés à l'ADEME

## Informations du document

Périmètre de diffusion : Consortium / ~~Public~~ / ~~Administration~~

Type : Intermédiaire / ~~Final~~

Date prévue de livraison : 02/07/2021

Statut : ~~En cours~~ / ~~Pour révision pairs~~ / ~~Pour révision Bureau~~ / Validé

### Auteurs :

Resp. du livrable	Organisation	Rôle dans le projet
Marc PIACENTINI	IRT SystemX	Coordinateur et contributeur de tâche 2.4
Karla QUINTERO	IRT SystemX	Contributrice à la tâche 2.3
Mohamed Idriss KHALEDI	IRT SystemX	Contributeur à la tâche 2.4
Yacine MEZALI	IRT SystemX	Contributeur à la tâche 2.4
Loufi BELAARIBI	IRT SystemX	Contributeur à la tâche 2.4
Boussaad SOUALMI	IRT SystemX	Contributeur à la tâche 2.4
Hakim SOUKI	IRT SystemX	Contributeur à la tâche 2.4
Yacine MEZALI	IRT SystemX	Contributeur à la tâche 2.4
Relecteurs	Organisation	
Sana TMAR	IRT SystemX	Responsable et coordinatrice du lot 2
Mohamed TLIG	IRT SystemX	Responsable de tâche 2.4

### Table de révision :

Version	Date	Contenu de la modification
0.2	05/05/2021	Initiation du document
1.0	05/05/2021	Description des scénarios
2.0	07/05/2021	Introduction, méthodologie et corrélation
3.0	14/05/2021	Description des plateformes de simulation
4.0	26/05/2021	Application de la méthode de corrélation et ajout des figures de comparaison

## Table des matières

Informations du document .....	2
Table des matières .....	3
Table des illustrations et tableaux .....	4
Glossaire.....	6
Résumé exécutif.....	7
Introduction .....	9
<b>1. Objectif du livrable .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Description générale de la Preuve de Concept (POC).....</b>	<b>11</b>
2.1. Description générale de la méthodologie .....	11
2.1.1. Phase de sélection du cas d’usage .....	12
2.1.2. Phase de création du cas d’usage .....	12
2.1.3. Phase de simulation.....	12
2.1.4. Phase de validation.....	13
2.2. Architecture de la plateforme de simulation outillée.....	13
2.2.1. SCANeR™studio.....	13
2.2.2. Modèles externes.....	14
2.3. Méthodes de corrélation.....	15
2.3.1. Méthode IAPE.....	15
2.3.2. Métriques supplémentaires .....	17
<b>3. POC pour le véhicule particulier .....</b>	<b>20</b>
3.1. Cas d’usage .....	20
3.2. Plateforme de simulation.....	24
3.2.1. Terrain (Environnement 3D).....	25
3.2.2. Véhicule .....	27
3.2.3. Capteurs .....	28
3.2.4. Autonomous Driver .....	29
3.3. Corrélation .....	29
3.4. Conclusion .....	36
<b>4. POC : navette autonome.....</b>	<b>37</b>
4.1. Cas d’usage .....	37
4.2. Plateforme de simulation.....	42
4.2.1. Terrain (Environnement 3D).....	43
4.2.2. Véhicule .....	43
4.2.3. Capteurs .....	44
4.2.4. Autonomous Driver (AD) .....	46
4.3. Corrélation .....	47
4.4. Conclusion .....	49
<b>Annexes .....</b>	<b>50</b>
<b>Références.....</b>	<b>51</b>

## Table des illustrations et tableaux

Tableau 1 : Scénarios traités dans le cadre du livrable.....	10
Figure 1 : Méthodologie de simulation numérique .....	11
Figure 2 : Schéma générique d'un outil de simulation .....	13
Figure 3 : Distance de Fréchet discrète .....	17
Figure 4 : Lock-step (Euclidean) alignment .....	18
Figure 5 : DTW alignment .....	18
Tableau 2 : Indicateurs de corrélation .....	19
Figure 6 : Définition des trajectoires des véhicules .....	20
Figure 7 : Scénarios ELK Road Edge.....	21
Figure 8 : Scénarios ELK Ligne solide.....	21
Figure 9 : ELK Chemins de scénario de véhicule en sens inverse .....	22
Figure 10 : Scénario de dépassement ELK .....	23
Figure 11 : Scénarios de lignes pointillées LKA.....	23
Figure 12 : Scénarios de lignes pleines LKA .....	23
Figure 13 : Architecture de la mil LSS .....	24
Figure 14 : Image du marquage pour les scénarios DashedRoadEdge_CentreLine.....	25
Figure 15 : Image du marquage pour les scénarios RoadEdge_CentreLine.....	25
Figure 16 : Image du marquage pour les scénarios SolidRoadEdge_CentreLine.....	25
Figure 17 : Image du marquage pour les scénarios SolidLine_NoCentreLine .....	26
Figure 18 : Image du marquage pour les scénarios DashedLine_NoCentreLine .....	26
Figure 19 : Image du marquage pour les scénarios DashedLine_NoCentreLine .....	26
Figure 20 : Image du marquage pour les scénarios SolidLine_NoCentreLine .....	27
Figure 21 : Véhicule 3D utilisé pour les simulations.....	27
Figure 22 : Paramètres du véhicule particulier dans SCANeR™studio .....	28
Figure 23 : ELK_SolidRoadEdge_Centreline_PassengerSide_05mps signals .....	30
Figure 24 : ELK_SolidRoadEdge_Centreline_PassengerSide_05mps correlation table .....	30
Figure 25 : ELK_RoadEdge_Centreline_PassengerSide_05mps signals .....	31
Figure 26 : ELK_RoadEdge_Centreline_PassengerSide_05mps correlation table .....	31
Figure 27 : ELK_DashedRoadEdge_Centreline_PassengerSide_05mps signals .....	32
Figure 28 : ELK_DashedRoadEdge_Centreline_PassengerSide_05mps correlation table.....	32
Figure 29 : LKA_DashedLine_NoCentreline_PassengerSide_05mps signals .....	33
Figure 30 : LKA_DashedLine_NoCentreline_PassengerSide_05mps correlation table .....	33
Figure 31 : LKA_SolidLine_NoCentreline_PassengerSide_05mps signals.....	34
Figure 32 : LKA_SolidLine_NoCentreline_PassengerSide_05mps correlation table.....	34
Figure 33 : LKA_DashedLine_NoCentreline_DriverSide_05mps signals.....	35
Figure 34 : LKA_DashedLine_NoCentreline_DriverSide_05mps correlation table.....	35
Figure 35 : Car-to-Pedestrian Farside Adult 50% .....	37
Figure 36 : Simulation use case “pedestrian detection” .....	39
Figure 37 : Position longitudinale de la Target relative à navette scénario CCRb .....	40
Figure 38 : résultat simulation de scénario CCRb.....	41
Figure 39 : Distance du véhicule cible par rapport à la navette.....	41
Figure 40 : Résultats de simulation du scénario de cut-in.....	42
Figure 41 : Plateforme de simulation fonctionnelle .....	42
Figure 42 : Image du marquage SolidRoadEdge_CentreLine pour le scénario 1.....	43
Figure 43 : Image du marquage SolidRoadEdge pour le scénario 2.....	43
Figure 44 : Paramètres de la navette dans SCANeR™studio.....	44
Figure 45 : Description de la caméra avant dans SCANeR™studio.....	45
Figure 46 : Description de la caméra arrière dans SCANeR™studio .....	45
Figure 47 : Architecture du système [SVR ISX-SVR-LIV-1122] .....	47
Figure 48 : courbe d'évolution de la pression dans le système de freinage .....	48

Figure 49 : profil de la décélération de la navette pendant le freinage simulation (gauche) vs essai (droite) ..... 48

Figure 50 : profile de la décélération de la navette pendant le freinage simulation (gauche) vs essai (droite) ..... 49

## Glossaire

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
DGITM	Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer
DTLE	Distance to The Lane Edge
DTW	Dynamic Time Warping
ELK	Emergency Lane Keeping
GVT	Global Vehicle Target
LDW	Lane Departure Warning
LKA	Lane-Keeping Assist
LSS	Lane Support Systems
MIL	Model In the Loop
POC	Proof-Of-Concept (Preuve de concept)
STPA	Systèmes de Transports Publics Automatisés
SOTIF	Safety Of The Intended Functionality (sécurité de la fonctionnalité prévue)
VUT	Vehicle Under Test
VP	Véhicule particulier

## Résumé exécutif

Le déploiement de systèmes de transports autonomes que ce soit pour les Véhicules Particuliers (VP) ou pour les Systèmes de Transports Publics Automatisés (STPA) aura un fort impact sur l'évolution de la société, en termes de sécurité, d'environnement, d'urbanisme. En plus d'élargir l'accès à la mobilité, ces systèmes peuvent également contribuer à réduire le nombre d'accidents et presque-accidents liés à la conduite automobile.

La sécurisation des véhicules de conduite automatisée est l'un des facteurs les plus importants et aucun système n'a aujourd'hui fait la preuve de sa capacité à tenir les exigences requises. Elle englobe plusieurs aspects qui nécessitent des approches spécifiques dépendantes du type du système, de son environnement et de son domaine d'opération, ainsi que des niveaux de sécurité à atteindre. Il faut :

- Sécuriser le système vis-à-vis de défaillances (« safety »),
- Protéger le système des attaques extérieures (cyber sécurité et « security »),
- Éviter des prises de décisions erronées par le système dues par exemple à une mauvaise interprétation de son environnement par celui-ci au travers de ses capteurs (« fonctionnel sûr » ou « Safety Of The Intended Functionality »),
- Empêcher le conducteur ou l'opérateur de faire une mauvaise utilisation du système (les mésusages ou détournement d'usages potentiellement prévisibles). (EMA : cela fait partie du SOTIF.)

Pour la démonstration de la sécurité d'un tel système, il est nécessaire de disposer de méthodologies et référentiels communs partagés entre toutes les parties prenantes (constructeurs, opérateurs, collectivités et autorités, etc.). Il est notamment nécessaire de disposer de référentiels d'objectifs de sécurité, d'un catalogue de scénarios critiques pertinents pour la démonstration de la sécurité, ainsi que de plusieurs méthodes complémentaires permettant de démontrer les niveaux d'atteinte des objectifs de sécurité (selon le type de système à tester dans leur environnement et contextes opérationnels) suivant une approche globale cohérente.

A propos du livrable

Ce livrable s'inscrit dans le cadre de la tâche 2.4 et a pour objectif de présenter un POC d'expérimentation utilisant une méthodologie de simulation à base de scénarios pour la validation des aspects sécuritaires de la Navette Autonome.

La tâche consiste à définir une méthodologie de simulation numérique à base de scénario pour contribuer à la démonstration de la sécurité pour ensuite tester cette méthodologie.

La méthodologie proposée comporte quatre étapes majeures :

1. Sélection des cas d'usage
2. Création des scénarios de simulation
3. Simulations numériques des scénarios
4. Comparaison essais physiques et simulation

L'étape de sélection des cas d'usage se base sur les cas sélectionnés par les partenaires et les cas remarquable mettant les systèmes étudiés face à des cas complexes. La seconde consiste à créer des scénarios de simulation sur la base des cas d'usage sélectionnés à intégrer au cours de la troisième étape sur la plateforme de simulation. Enfin la dernière étape est consacrée à la

comparaison des essais réels et de la simulation à l'aide de méthodes spécifiques (Ref méthodes de corrélation).

Pour démontrer que la simulation est un outil de validation efficace, il est nécessaire d'avoir un large échantillon de scénarios variés pour tenir compte de la complexité de l'environnement réel. A ce jour et pour cette version intermédiaire du POC, cette condition en disponibilité d'un large nombre de scénarios n'est pas valable : comme les essais physiques extraits du roulage ne sont pas tous disponibles, ce livrable se base sur un nombre limité de cas d'usage. Ce livrable intermédiaire présente la méthodologie utilisée et son application sur les premiers essais fournis par nos partenaires du projet SAM Transdev pour le cas d'usage STPA- Expérimentation n° 8 à Rouen et Renault pour le cas d'usage VP.

## Introduction

Les véhicules autonomes sont une technologie émergente du futur, néanmoins leur développement est complexe et la validation de ces derniers longue et fastidieuse. Pour faciliter l'intégration des futurs véhicules autonomes, il est nécessaire d'expérimenter massivement. Ceci pour permettre à la fois de développer les usages et la connaissance de ces systèmes par les citoyens et les acteurs des territoires, et de construire le futur cadre de régulation, notamment en termes de validation de la sécurité.

Le projet SAM vise à élaborer un « bien commun », défini par l'ensemble des connaissances dont la mutualisation et le partage avec les autorités publiques bénéficient à l'élaboration des politiques publiques et à la construction d'un état de l'art, notamment en matière de sécurité, d'impacts et d'acceptabilité.

Ce bien commun sera construit autour d'une approche méthodologique commune et partagée, dans les trois domaines d'application ciblés : véhicule particulier autonome, système autonome de transport collectif et partagé, système autonome de transport de marchandises.

La validation des véhicules autonomes est un véritable défi à l'égard de la complexité et la variation infinie de l'environnement de roulage que peut rencontrer sur la route le véhicule autonome. Afin de réduire le nombre de kilométrages parcouru en test du véhicule autonome, la validation par simulation devient une solution indispensable dans le processus de développement.

Les objectifs de sécurité nécessaires à atteindre par de telle technologie pour qu'elle soit mise en place est souvent difficilement atteignable par des tests et essais physiques. Par exemple, il est estimé qu'un très grand nombre de kilomètres de tests de roulage sont nécessaires pour valider une telle technologie. Ceci pouvant réellement prendre des années pour s'effectuer ainsi qu'un très grand coût.

La simulation paraît être un moyen complémentaire permettant de vérifier le comportement des véhicules autonomes au niveau modèle.

Dans le présent livrable on présente un POC d'expérimentation utilisant une méthodologie de simulation à base de scénarios pour la validation des aspects sécuritaires de la Navette Autonome et du Véhicule Particulier.

## 1. Objectif du livrable

L'objectif du présent document est de présenter l'application de la méthodologie adoptée sur des cas concrets. Les points suivants seront donc abordés :

- Un descriptif global de la méthodologie utilisée
- Présentation des méthodes de corrélation pertinentes dans l'application de la méthodologie
- L'architecture de la plateforme de simulation outillée et les modèles qui la composent
- Création et simulation des cas d'usage

Ci-dessous un tableau résumant l'ensemble des scénarios simulés :

Systeme	Sous-système	Scénarios
AEB		Car-to-Car Rear Stationary <i>Freinage sur véhicule cible arrêté</i>
		Car-to-Pedestrian <i>Freinage sur piéton</i>
LSS	ELK	RoadEdge <i>Maintien de voie sur bord de route</i>
		Solid Line <i>Maintien de voie sur ligne continue</i>
		Oncoming vehicle <i>Maintien de voie sur véhicule arrivant dans la voie opposée</i>
		Overtaking vehicle <i>Maintien de voie sur véhicule dépassant le véhicule EGO</i>
	LKA	Dashed Line <i>Maintien dans la voie avec ligne pointillée</i>
		Solid Line <i>Maintien dans la voie avec ligne continue</i>

Tableau 1 : Scénarios traités dans le cadre du livrable

- Comparaison entre les essais physiques et les scénarios simulés
- Optimisation de la plateforme de simulation

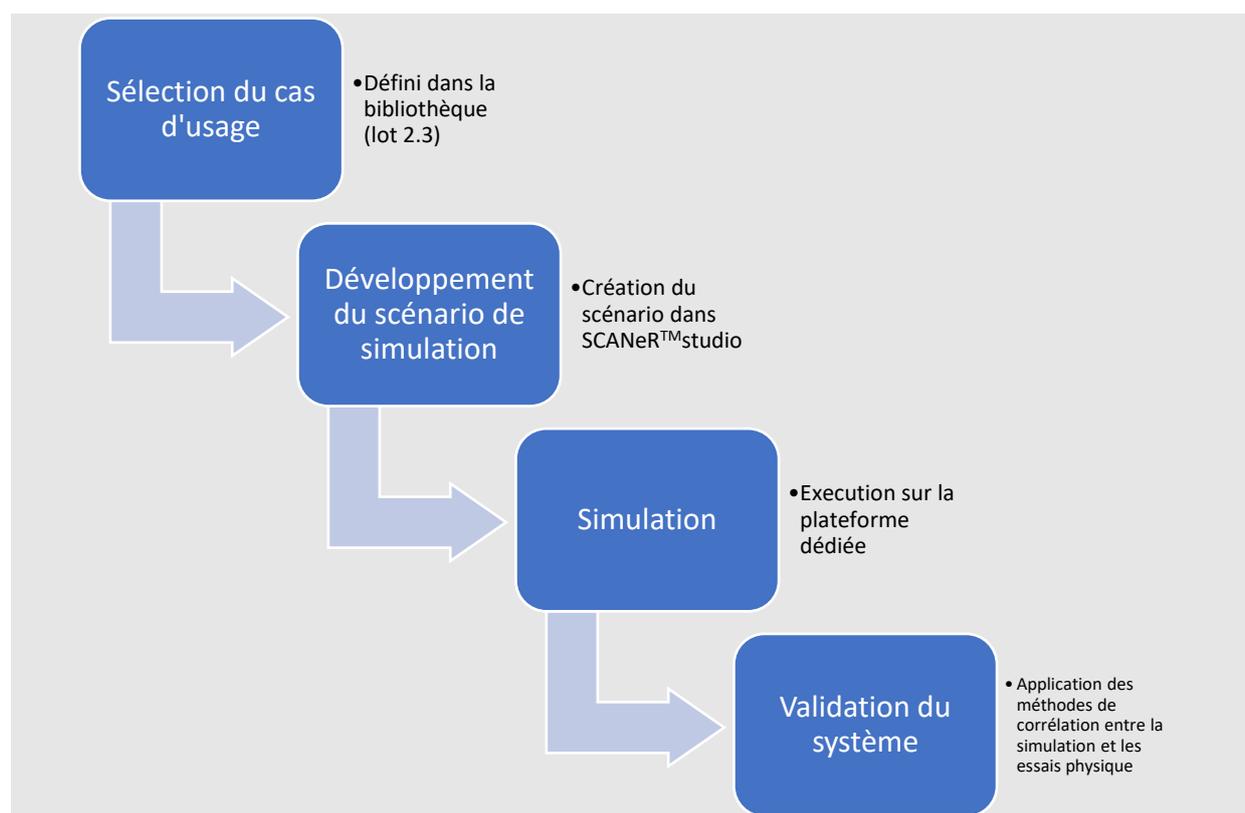
## 2. Description générale de la Preuve de Concept (POC)

### 2.1. Description générale de la méthodologie

Cette partie présente la structure globale de la méthodologie de simulation mise en place dans le cadre du projet SAM. Cette méthodologie a pour objectif de proposer à partir de la base des scénarios<sup>1</sup> mis en commun dans le cadre de la tâche 2.3, un processus de validation par la simulation. Pour rappel, la tâche 2.3 a pour ambition de construire et de partager un catalogue de scénarios pertinents pour la démonstration de la sécurité.

Le processus de la méthodologie proposé se résume en quatre phases principales (cf. Figure 1)

1. Phase de sélection du cas d'usage
2. Développement du scénario de simulation
3. Simulation sur la plateforme associée
4. Phase d'analyse et de validation



*Figure 1 : Méthodologie de simulation numérique*

<sup>1</sup> Les scénarios et les cas d'usage sélectionnés pour la réalisation de ce POC ont fait l'objet de l'accord des partenaires : Renault pour les cas d'usage VP et Transdev pour les cas STPA

### 2.1.1. Phase de sélection du cas d'usage

La phase de sélection du cas d'usage dépend du système que l'on désire valider. Cette sélection est faite à partir de la base MOSAR utilisée pour stocker l'ensemble des cas d'usage considérés comme pertinents (récurrents lors de roulage, imposants un fonctionnement non nominal au système étudié ou susceptibles d'apporter un fonctionnement non nominal). Evidemment, cette étape est en lien avec le processus de développement du véhicule. La validation de la dynamique véhicule, du système de freinage ou du comportement du chauffeur autonome ne nécessite pas les mêmes contraintes.

### 2.1.2. Phase de création du cas d'usage

La phase de création des scénarios adaptés à la plateforme de simulation découle du cas d'usage sélectionné. Actuellement il n'existe pas de processus normalisé pour la conception des scénarios de simulation, néanmoins dans le cadre de SAM, la bibliothèque MOSAR est l'outil principal dans le processus de spécification des scénarios. Il y est décrit les scénarios sous trois formes explicitées ci-dessous. Les définitions suivantes sont tirés du livrable 2.1-5 Glossaire Safety:

- Scénario fonctionnel
  - « Classe, famille de scénarios regroupés sous un nom commun. »
- Scénario logique
  - « Scénario dont la logique de déroulement est définie, i.e. l'enchaînement des scènes et des actions & événements est complètement défini de la scène initiale à la scène finale. Pour chaque paramètre spécifiant du scénario un intervalle de variation est donné. »
- Scénario concret
  - « Scénario dont l'ensemble des valeurs numériques des paramètres spécifiant du scénario logique est défini. »

Pour la création du scénario de simulation nous pouvons nous baser sur les deux dernières formes à savoir le scénario logique et concret. En effet à partir de la logique, il est possible de développer un modèle de scénario sur lequel les paramètres variables sont renseignés. Cela passe par une reproduction de l'environnement 3D, l'ajout des acteurs du cas d'usage (véhicule sujet « l'Ego »/véhicule cible/piétons) ainsi que la création d'un script permettant la variabilité des paramètres. A partir de ce modèle, la génération de scénario concret peut être effectuée grâce à l'outil de simulation sélectionné. La seconde possibilité est de reproduire un cas d'usage concret en scénario de simulation, de la même manière que pour la retranscription du scénario logique mais avec un développement simplifié par la constance des paramètres de simulation.

### 2.1.3. Phase de simulation

La phase de simulation représente l'exécution des scénarios, créés lors de la phase précédente, sur la plateforme de simulation développée pour le système étudié. Les systèmes étudiés sont des véhicules autonomes de type particuliers ou navettes. Les outils de simulation décrits dans le premier livrable de cette tâche, intitulé: « 2.4-1-Etat des lieux sur les méthodologies de simulation numérique émanant des travaux réglementaires et normatifs » forme le cœur de la plateforme de simulation néanmoins celle-ci se forme de plusieurs blocs décrivant les différentes parties du système global (modèle dynamique/capteur). Etant donné que le simulateur n'intègre pas le modèle étudié (dynamique/contrôleur) c'est pourquoi une alternative a été proposée à

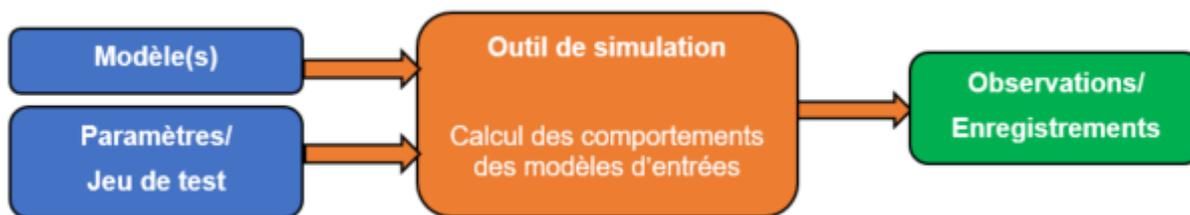
savoir : la plateforme doit être construite pour rassembler l'ensemble des blocs constituant le système réel. Nous décrivons dans la partie suivante l'architecture de cette dernière et principalement l'outil de simulation sélectionné dans le cadre de ce POC. En sortie de la plateforme les résultats décrivent les comportements du modèle et sont utilisés pour la phase suivante.

#### 2.1.4. Phase de validation

La phase de validation du système repose sur la bonne représentation de la simulation. Cette qualité de reproduction est vérifiée par la comparaison de la simulation avec l'essai réel associé. La comparaison est effectuée grâce à une méthode de corrélation. Cette méthode est décrite dans la troisième partie de ce chapitre : « 2.3 Méthode de corrélation ».

## 2.2. Architecture de la plateforme de simulation outillée

Les outils de simulation sont indispensables pour pouvoir vérifier qu'un modèle de système complexe exhibe le comportement attendu de lui. D'une manière générale, un outil de simulation prend un modèle en entrée et un ensemble de paramètres et fournit un ou plusieurs traces de simulation en sortie. Ces traces peuvent être ensuite utilisées pour vérifier si les exigences du système sont bien satisfaites par le modèle.



*Figure 2 : Schéma générique d'un outil de simulation*

Dans le cadre de ce projet, il a fallu sélectionner un outil permettant d'y simuler les cas d'usage rencontré par les industriels. Par conséquent il est nécessaire d'avoir un outil de simulation 3D intégrant l'ensemble des paramètres d'un cas d'usage réel. Dans l'ensemble des outils disponibles, SCANer™studio<sup>2</sup> a été retenu. Tout d'abord car il est grandement utilisé par les partenaires du projet et acteurs de cette tâche, mais aussi car il permet l'interfaçage avec un large nombre de logiciels tiers, ce qui dans la construction d'une plateforme de simulation permet d'étendre le champ des possibles.

#### 2.2.1. SCANer™studio

Développé pour des experts de l'automobile, SCANer™studio est conçu pour répondre aux besoins spécifiques des professionnels de la simulation dynamique. L'utilisation du logiciel a été pensée, initialement, autour du processus d'utilisation des simulateurs de conduite et a été structuré autour de cinq modes dédiés accessibles depuis l'interface graphique :

<sup>2</sup> Logiciel de simulation développé par AV Simulation, <https://www.avsimulation.com/>

- **TERRAIN** : Edition de réseau routier RoadXML sous format manuel ou automatique via l'import de différents type de base de données routières (GPX, XML, OSM, SHP, ..);
- **VÉHICULE** : Outil de mise au point et d'étude de modèles dynamiques dispose d'un modèle dynamique non linéaire et peut importer des modèles externes;
- **SCÉNARIO** : Editeur de scénario de simulation de conduite qui dispose de ses propres fonctions qui permettent de définir des scénarii complexes de simulation et il permet également l'import de scénarii développés sous python.
- **SIMULATION** : Outil de supervision de la simulation et du simulateur, couplé à Matlab/Simulink pour une cosimulation entre les deux environnements;
- **ANALYSE** : Outil graphique d'analyse fine des données de simulation. Toutes les données du scénario de simulation sont enregistrées d'une manière synchrone et peuvent être affichés dans des graphiques ou exporter sous d'autres formats.

SCANeR studio dispose de plusieurs modèles génériques de capteurs (Radar, Caméra, GPS, Ultrason, ...). La modularité et la richesse de l'environnement SCANeR lui permettent d'être utilisé pour concevoir les systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS), les analyser, les optimiser et les valider :

- **Conception des ADAS** :
  - Navigation system;
  - Adaptive Cruise Control (ACC);
  - Lane Departure Warning (LDW);
  - Distance Warning (DW);
- **Analyse et optimisation « Environnement-Véhicule-conducteur »**
  - Environnement
    - Modéliser une infrastructure routière et la parcourir avec différents acteurs.
    - Gestion des conditions météorologiques et d'éclairage.
    - Modéliser le comportement dynamique d'un ou de plusieurs acteurs.
  - Véhicule
    - Gérer les capteurs (Radar, Caméra, GPS, ...).
    - Mettre en situation et évaluer les ADAS.
  - Conducteur
    - Modéliser et analyser le comportement du conducteur.
- **Validation**
  - MIL (Model in the Loop)
  - SIL (Software in the Loop)
  - HIL (Hardware in the Loop)

### **2.2.2. Modèles externes**

La plateforme de simulation est utilisée dans cette méthodologie pour prouver l'efficacité et la sûreté d'un système de conduite autonome. Dans la partie précédente nous avons présenté

l'outil de calcul et d'exécution de la simulation, seulement pour que celle-ci soit pertinente il faut impliquer les modèles à tester. Ces systèmes représentés précédemment (*cf Figure 2*) sont dans le cadre de la validation d'un véhicule autonome de plusieurs natures :

- modèle dynamique
- chauffeur autonome
- capteurs
- etc...

Les modèles dynamiques peuvent être intégrés de plusieurs façons à la plateforme, SCANeR™studio qui embarque par défaut trois types de modèles (simples, intermédiaire et CALLAS), du plus simple au plus complexe permettant la description complète d'un véhicule. Cependant les modèles sont généralement décrits à partir d'autres outils tels que : CarSim<sup>3</sup>, AMESim<sup>4</sup>. Il faut donc bâtir une configuration particulière pour relier ces outils à SCANeR™studio.

Les chauffeurs autonomes ainsi que les capteurs sont décrits de la même manière. Ceux-ci sont modélisés via des outils tels que Matlab/Simulink<sup>5</sup> ou RTMaps<sup>6</sup>. SCANeR™studio ayant une structure modulaire, facilite la communication avec ces outils. Dans la suite de ce document nous présenterons les modèles intégrés sur les plateformes outillées dans le cadre des travaux d'expérimentations. En effet bien que SCANeR™studio ait nombre de ces modèles à disposition par défaut, ceux-ci, à moins de les modifier ne correspondent pas aux systèmes que l'on désire étudier.

## 2.3. Méthodes de corrélation

Afin d'étudier la corrélation entre les essais de roulages réels et de simulation, on utilise des techniques basées sur le calcul de plusieurs indicateurs/métriques utilisés pour la comparaison de (similarité, dissimilarité) entre séries temporelles. Ces dernières seront présentées et formulées dans les deux sections qui suivent.

### 2.3.1. Méthode IAPE

C'est une méthode basée sur une paire de courbes (courbe du signal test réel et courbe du signal simulé) et qui permet à travers ses différents indicateurs (I, A, P, E) de produire un seul scalaire entre 0 et 1 (avec 1 correspond à une corrélation parfaite) qui caractérise la qualité de la corrélation. Cette méthode a été utilisée et approuvée dans les travaux du système AEB (Automatic Emergency Braking) et on trouve aussi qu'elle est applicable pour le système LSS (Lane Support Systems). Les différents indicateurs I, A, P, E sont définis comme suit :

- Critère d'apparition du moment des pics (I)

Ce critère est utilisé pour comparer le moment d'apparition des pics max&min des deux courbes  $f$  et  $g$ . Il est défini par la formule suivante :

---

<sup>3</sup> Progiciel commercial qui prédit les performances des véhicules en réponse aux commandes du conducteur dans un environnement donné

<sup>4</sup> Logiciel de simulation pour la modélisation et l'analyse de systèmes 1D multi-domaines

<sup>5</sup> Simulink est un logiciel de modélisation système multi-physique

<sup>6</sup> Environnement de développement logiciel et d'exécution orienté composant

$$I = \frac{\max(0, T_{f_{extr}} * T_{g_{extr}})}{\max(T_{f_{extr}}^2, T_{g_{extr}}^2)}$$

avec  $T_{f_{extr}}$  est le moment où  $|f(t)|$  est maximum et  $T_{g_{extr}}$  est le moment où  $|g(t)|$  est maximum.

- Critère d'amplitude des pics (A)

Ce critère est utilisé pour comparer les amplitudes des pics extrêmes max&min des deux courbes  $f$  et  $g$ . Il est défini par la formule suivante :

$$A = \frac{\max(0, f_{extr} * g_{extr})}{\max(f_{extr}^2, g_{extr}^2)}$$

avec  $f_{extr}$  est le  $f(T_{f_{extr}})$  et  $g_{extr}$  est le  $g(T_{g_{extr}})$ .

- Critère de profil de la courbe (P)

Ce critère est utilisé pour calculer la moyenne des moindres carrés de l'erreur à chaque point. Il est défini par la formule suivante :

$$P = 1 - \sqrt{\frac{\sum_n \max(|f(t_n)|, |g(t_n)|) \cdot \left(1 - \frac{\max(0, |f(t_n)| * |g(t_n)|)}{\max(\delta, f(t_n)^2, g(t_n)^2)}\right)^2}{\sum_n \max(|f(t_n)|, |g(t_n)|)}}$$

avec  $\delta$  étant une très petite valeur par rapport à 1,  $f(t_n)$  est le nième point de la courbe  $f$  et  $g(t_n)$  est le nième point de la courbe  $g$ .

- Critère d'erreur (E)

Ce critère est utilisé pour calculer l'intégrale de l'erreur sur la durée considérée des deux courbes. Il est défini par la formule suivante :

$$E1 = \exp\left(- \cdot \frac{1}{t_{max} - t_{min}} \cdot \int_{t_{min}}^{t_{max}} \left| \frac{f(t) - g(t)}{\max(|f(t)|, |g(t)|)} \right| dt \right)$$

$$E2 = \exp\left(- \cdot \frac{1}{t_{max}-t_{min}} \cdot \left| \int_{t_{min}}^{t_{max}} \frac{f(t)-g(t)}{\max(|f(t)|,|g(t)|)} dt \right| \right)$$

$$E = 1 - \sqrt{\frac{(1 - E1)^2 + (1 - E2)^2}{2}}$$

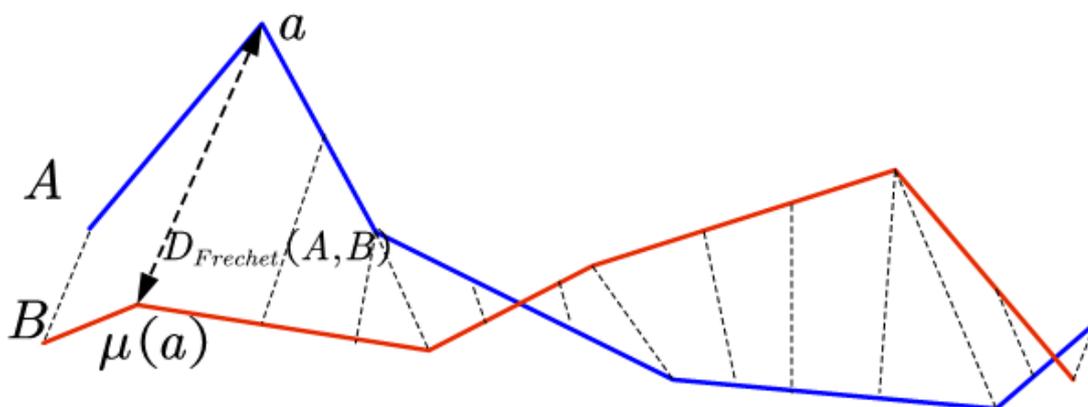
L'avantage de la méthode IAPE c'est qu'elle est compréhensible par les experts métier et est déjà utilisée et approuvée comme méthode de comparaison empirique dans les travaux de l'AEB. On peut également enrichir ces indicateurs (I, A, P, E) par des métriques supplémentaires utilisées dans la comparaison de séries temporelles apportant ainsi des informations complémentaires non mesurées par les IAPE.

### 2.3.2. Métriques supplémentaires

- Distance de Fréchet discrète :

La distance de Fréchet discrète [2, 3, 4, 5], aussi nommée (distance de couplage) est une mesure de similarité qui prend en compte la position et l'ordre des points le long des courbes. En fait c'est une approximation de la distance de Fréchet pour les courbes polygonales. Elle peut être définie comme la distance qui correspond au minimum (inf) de tous les couplages possibles entre les points/sommets des deux courbes de façon de minimiser la longueur maximale de la distance entre ces derniers. L'avantage de l'utilisation de cette métrique est que la distance de Fréchet est discrète et peut être calculée dans un temps polynomial en utilisant la programmation dynamique.

La complexité temporelle de cet algorithme est de  $O((n+m)(\log(n+m)))$  avec n et m sont les longueurs des séries temporelles.



*Figure 3 : Distance de Fréchet discrète*

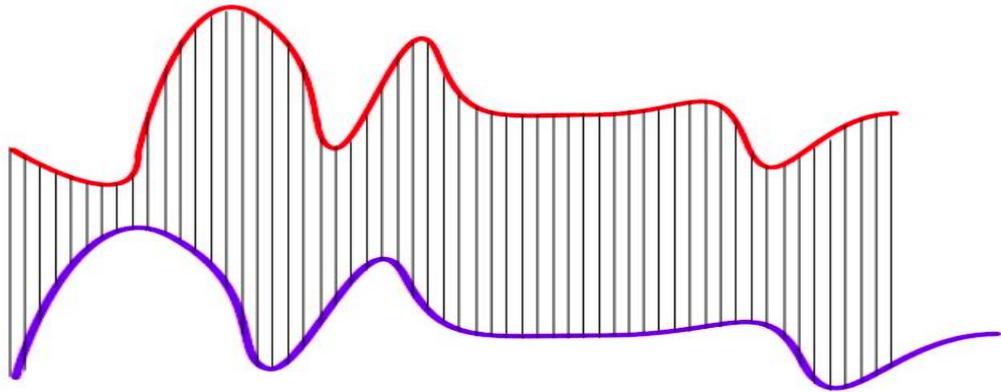
- Dynamic Time Warping (DTW) :

Dynamic Time Warping [6, 7, 8] est l'un des algorithmes permettant de mesurer la similitude entre deux séries temporelles (signaux/courbes) et de calculer le mapping optimal entre les deux en prenant en compte la distorsion temporelle entre les deux séries. Il permet de résoudre le

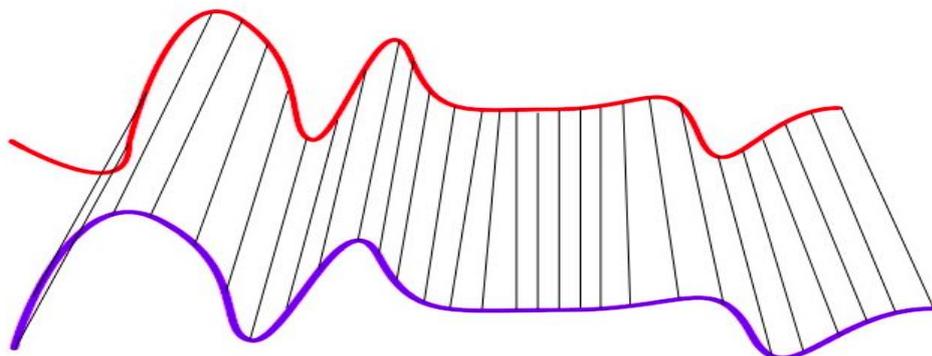
problème de série temporelle ayant différentes longueurs en développant un mapping “one-to-many” afin que les creux et les pics avec le même “pattern” soient parfaitement appariés. Certaines conditions sont nécessaires pour l’application du DTW et sont définies ci-dessous :

- Chaque indice de la première série doit être mis en correspondance avec un ou plusieurs indices de l’autre série et vice versa ;
- Le premier indice de la première série doit être mis en correspondance avec le premier indice de la deuxième série (mais il n’est pas nécessaire qu’il s’agisse de sa seule correspondance) ;
- Le dernier indice de la première série doit être mis en correspondance avec le dernier indice de la deuxième série (mais il n’est pas nécessaire qu’il s’agisse de sa seule correspondance) ;
- Le mapping des indices de la première série aux indices de la deuxième série doit être monotone croissant, et vice versa.

La complexité temporelle de cet algorithme est de  $O(n*m)$  avec  $n$  et  $m$  sont les longueurs des séries temporelles.



*Figure 4 : Lock-step (Euclidean) alignment*



*Figure 5 : DTW alignment*

- Critère d’erreur sur le spectre fréquentiel :

On complète nos métriques par un critère de calcul d’erreur sur le spectre fréquentiel des deux signaux. On effectue tout d’abord la transformée de Fourier pour les deux séries temporelles et

après on calcule la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sur leurs modules normalisés.

Cet indicateur permet de capter la dynamique des deux signaux.

- Corrélation croisée de Spearman :

Le coefficient de corrélation de Spearman [1] est une mesure de la dépendance statistique non paramétrique (entre les rangs/'ranks') des deux variables (deux séries temporelles). En d'autres mots, il répond à la question comment une variable change à mesure que l'autre change. On peut le définir comme étant le coefficient de corrélation de Pearson (PCC) appliqué sur les rangs/ranks des deux signaux.

Après que les valeurs des deux séries  $f$  et  $g$  sont converties en valeurs classées  $r_f$  et  $r_g$ , on peut définir le coefficient de corrélation de Spearman comme suit :

$$\rho(r_f, r_g) = \frac{cov(r_f, r_g)}{\sigma_{r_f} \cdot \sigma_{r_g}}$$

avec  $cov(r_f, r_g)$  est la covariance entre les rangs  $r_f$  et  $r_g$  et  $\sigma_{r_f}$ ,  $\sigma_{r_g}$  sont respectivement les écarts types des rangs  $r_f$  et  $r_g$ .

Ci-dessous un tableau récapitulatif des indicateurs précédemment décrits :

<u>Indicateurs</u>	<u>Description</u>	<u>Section/Page</u>
I	Critère d'apparition du moment des pics	2.3.1/16
A	Critère d'amplitude des pics	2.3.1/16
P	Critère de profil de la courbe	2.3.1/16
E	Critère d'erreur	2.3.1/17
Discrete Fréchet distance	Distance de Fréchet discrète	2.3.2/17
DTW	Dynamic Time Warping	2.3.2/18
Frequency_components_comparison_error	Critère d'erreur sur le spectre fréquentiel	2.3.2/19
Spearman correlation	Corrélation croisée de Spearman	2.3.2/19

Tableau 2 : Indicateurs de corrélation

### 3. POC pour le véhicule particulier

#### 3.1. Cas d'usage

Cette étude tourne autour de la fonction d'aide à la conduite LSS (Lane support system), cette fonction de maintien sur la voie surveille la position des véhicules et émet un avertissement lorsqu'un conducteur quitte sa voie de manière brusque ou involontaire.

##### Scénarios de test :

Les performances de la fonction LSS sont évaluées dans différents scénarios applicables aux systèmes :

- ELK Emergency Lane Keeping : Maintien de voie d'urgence.
- LKA Lane Keep Assist : Assistance au maintien de voie.
- LDW Lane Departure Warning : Avertissement de sortie de voie.

Les tests dans tous les scénarios seront effectués avec des pas incrémentiels de 0,1 m/s dans les vitesses latérales spécifiées pour les scénarios de test.

À des fins de test, supposons un chemin en ligne droite initial suivi d'un rayon fixe comme spécifié pour les scénarios de test, suivi à nouveau par une ligne droite, appelée ici le chemin de test. On contrôle le VUT (véhicule sous test) avec les entrées du conducteur ou en utilisant des systèmes de contrôle alternatifs qui peuvent moduler les commandes du véhicule si nécessaire pour effectuer les tests.

Les paramètres suivants doivent être utilisés pour créer les chemins de test :

Vlat [m/s]	R (m)	$\Psi$ VUT [°]	d1 (m)	d2 (m)
0.2	1200	0.57	0.06	0.70
0.3		0.86	0.14	0.90
0.4		1.15	0.24	0.80
0.5		1.43	0.38	0.75
0.6		1.72	0.54	0.60

Où le décalage latéral  $d$  par rapport au marquage de voie ou au bord de la route :  
 $d = d1 + d2 + \text{la moitié de la largeur du véhicule (m)}$

Avec :

d1 : distance latérale parcourue pendant la courbe établissant l'angle de lacet (m)

d2: distance latérale parcourue en régime permanent Vlat (m)

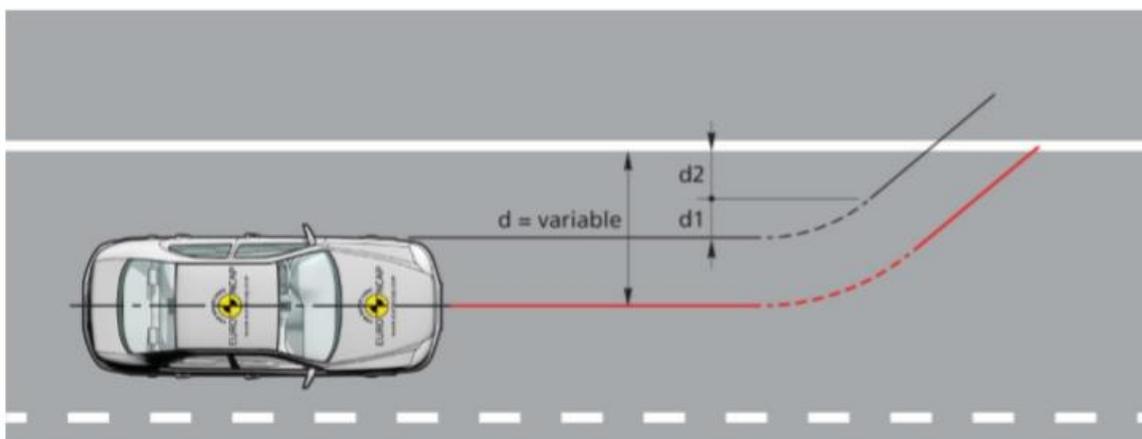
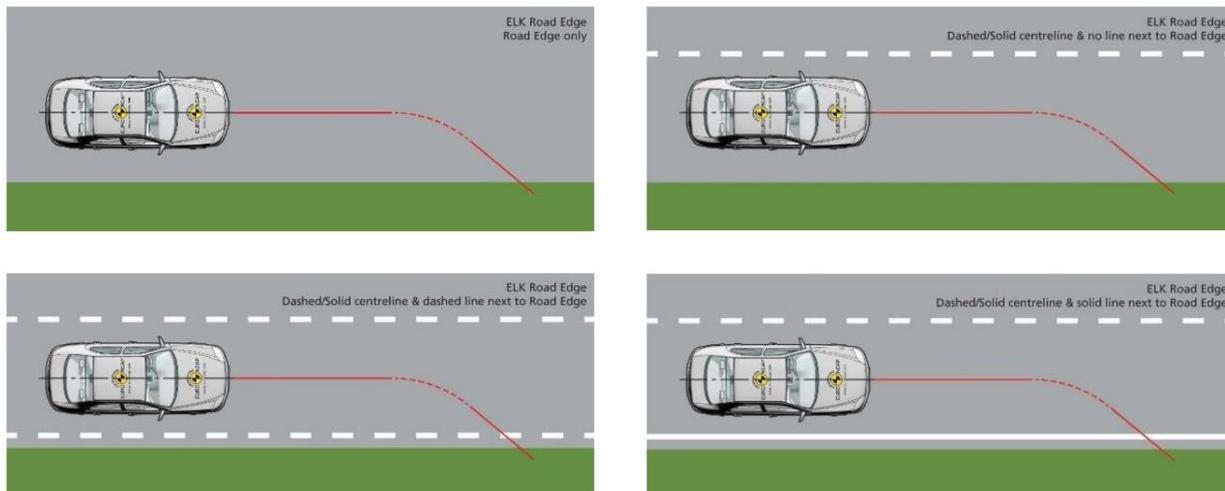


Figure 6 : Définition des trajectoires des véhicules

## 1. Tests de maintien de voie d'urgence :

### Essais de bord de route :

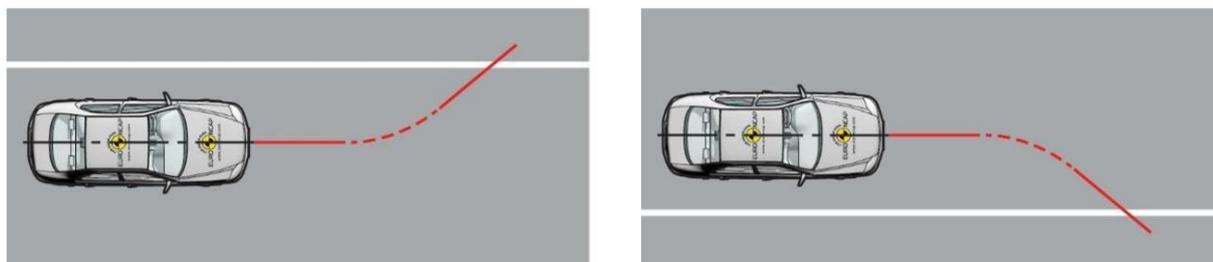
Les essais de bord de route ELK seront effectués avec des pas incrémentiels de 0,1 m/s dans la plage de vitesse latérale de 0,2 à 0,5 m/s pour les départs côté passager avant uniquement.



*Figure 7 : Scénarios ELK Road Edge*

### Essais en ligne pleine/Solide ELK :

Les essais en ligne pleine seront effectués avec des pas incrémentiels de 0,1m/ s dans la plage de vitesse latérale de 0,2 à 0,5 m/s pour les départs des deux côtés du véhicule sur une seule voie.

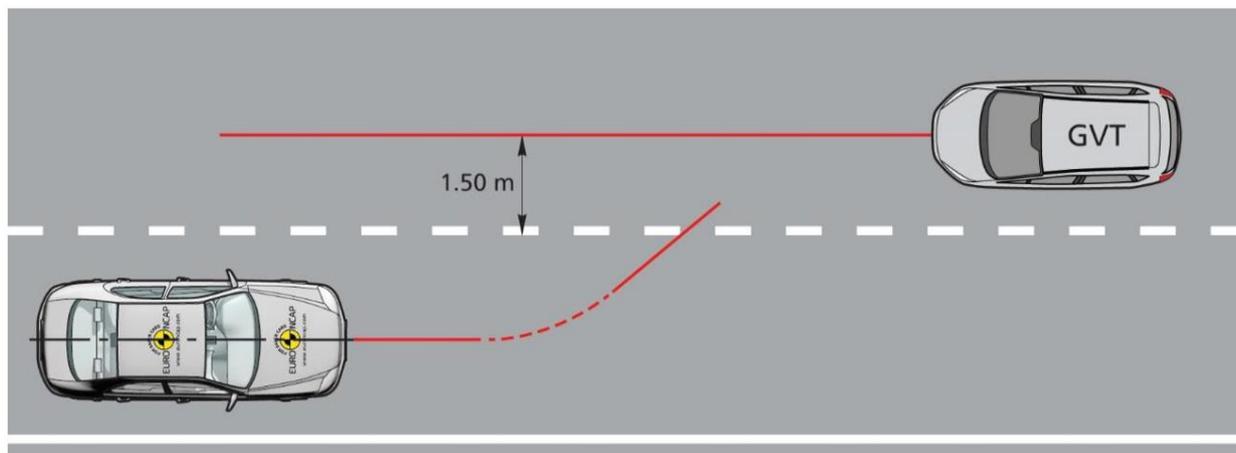


*Figure 8 : Scénarios ELK Ligne solide*

### Véhicule venant en sens inverse :

Pour le scénario en sens inverse, le GVT (Véhicule cible) suivra une trajectoire en ligne droite dans la voie adjacente à la position initiale du VUT (Véhicule sous test), dans la direction opposée au VUT. La trajectoire en ligne droite de la cible sera à 1,5 m du côté intérieur du marquage de voie en pointillés central de la voie VUT.

Les trajectoires du VUT et du véhicule cible seront synchronisées de sorte que les bords avant du véhicule se rencontrent avec une position latérale qui donne un chevauchement de 10% (en supposant aucune réaction du système) de la largeur du VUT.



*Figure 9 : ELK Chemins de scénario de véhicule en sens inverse*

Les essais de véhicules ELK venant en sens inverse seront effectués avec des pas incrémentiels de 0,1 m/s dans la plage de vitesse latérale de 0,3 à 0,6 m / s pour les départs du côté conducteur uniquement.

#### Véhicule de dépassement

Pour le scénario de dépassement, un GVT suivra une trajectoire en ligne droite dans la voie adjacente à la position initiale du VUT côté conducteur, dans la même direction que le VUT. La trajectoire en ligne droite de la cible sera à 1,5 m du côté intérieur du marquage de voie en pointillé central.

Les trajectoires du VUT et du véhicule cible seront synchronisées de sorte que la position longitudinale du bord d'attaque du véhicule cible soit égale à celle de l'essieu arrière du VUT au point d'impact (en supposant qu'aucune réaction du système ne soit prise).

Les essais de véhicule de dépassement ELK seront effectués avec des incréments de 0,1m/s dans la plage de vitesse latérale de 0,3 à 0,6 m / s pour les changements de voie involontaires et de 0,5 à 0,7 m / s pour les changements de voie intentionnels pour les départs au côté conducteur uniquement.

Les changements de voie non intentionnels et intentionnels sont testés dans deux situations:

- GVT et VUT se déplacent à la même vitesse (pas de vitesse relative)
- GVT à 80 km / h dépasse le VUT à 72 km / h (vitesse relative de 8 km / h)

Les paramètres suivants doivent être utilisés pour créer les trajectoires d'essai pour les essais de changement de voie intentionnel où le clignotant est appliqué à  $1,0 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$  avant  $T_{\text{steer}}$ :

( $T_{\text{steer}}$  : Moment au quel VUT entre dans le segment de courbe.)

Vlat [m/s]	R (m)	$\Psi$ VUT [°]	d1 (m)	d2 (m)
0.5	800	1.43	0.25	0.75
0.6		1.72	0.36	0.60
0.7		2.01	0.49	0.53

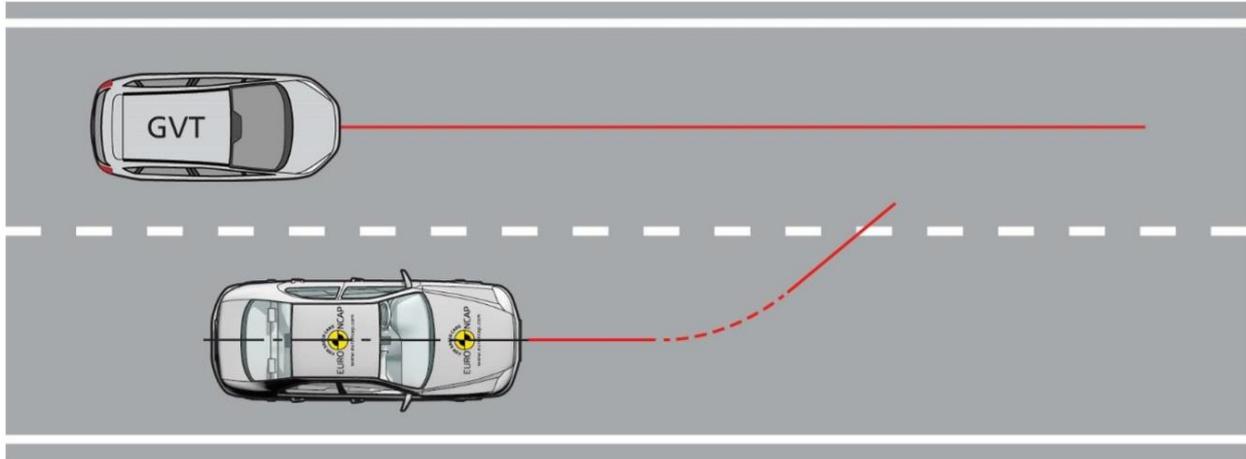
Où le décalage latéral d par rapport au marquage de voie:

$$d = d1 + d2 + \text{la moitié de la largeur du véhicule (m)}$$

Avec :

d1: distance latérale parcourue pendant la courbe établissant l'angle de lacet (m)

d2: distance latérale parcourue pendant l'état d'équilibre Vlat (m)

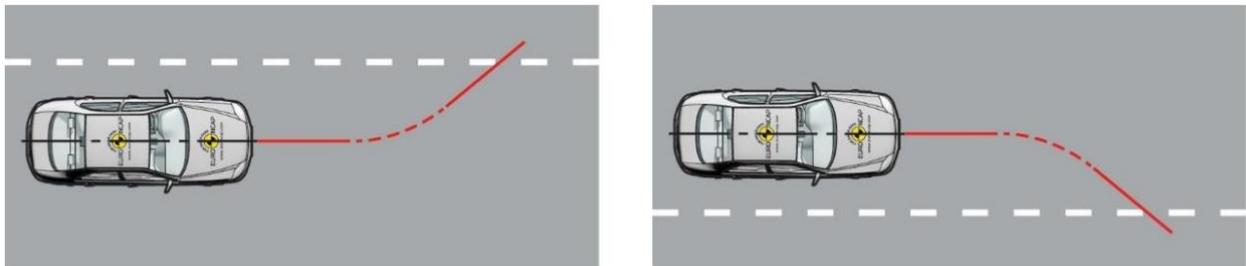


*Figure 10 : Scénario de dépassement ELK*

## 2. Tests d'assistance au maintien de voie :

Essais en ligne pointillée :

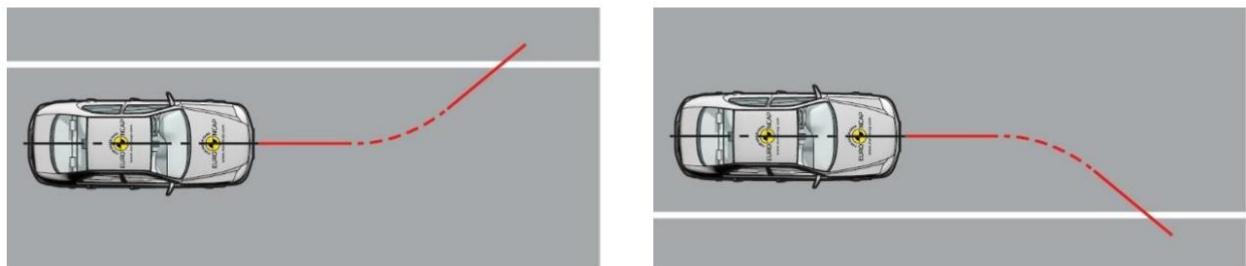
Les essais en ligne pointillée LKA seront effectués avec des pas incrémentiels de 0,1 m / s dans la plage de vitesse latérale de 0,2 à 0,5 m / s pour les départs des deux côtés du véhicule.



*Figure 11 : Scénarios de lignes pointillées LKA*

Essais en ligne pleine/solide :

LKA Les essais en ligne pleine seront effectués avec des incréments de 0,1 m / s dans la plage de vitesse latérale de 0,2 à 0,5 m / s pour les départs des deux côtés du véhicule.



*Figure 12 : Scénarios de lignes pleines LKA*

### 3. Tests d'avertissement de sortie de voie :

Dans le cas des systèmes LDW uniquement ou des systèmes où LDW peut être utilisé en tant que fonction autonome, effectuez les tests LKA sur une seule ligne.

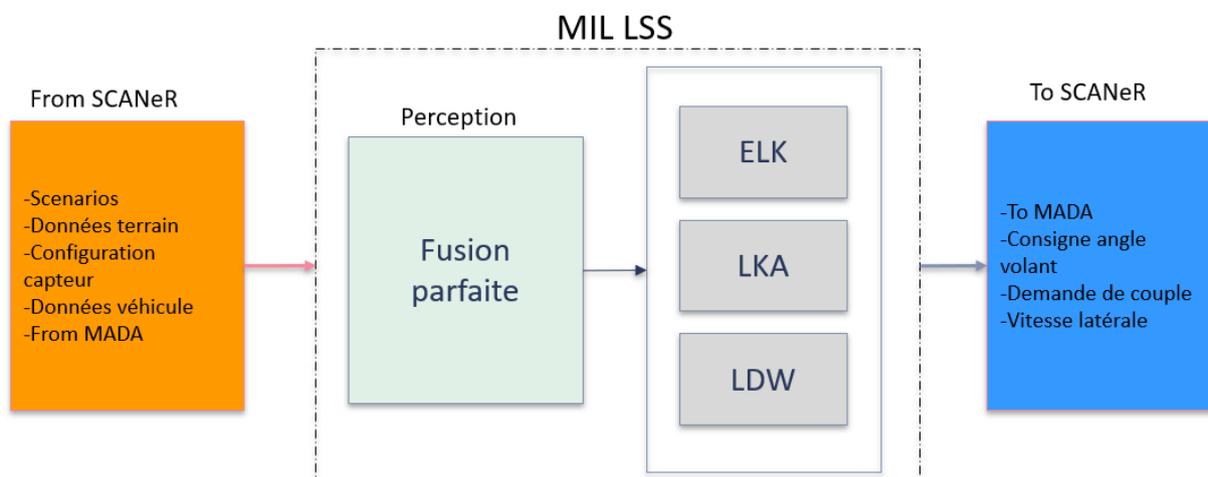
## 3.2. Plateforme de simulation

Spécifications de l'architecture de la plateforme MIL :

L'architecture de la plate-forme MIL est illustrée par la figure ci-dessous.

Cette architecture utilise :

- Dans la première partie SCANeR API développée en C ++/Matlab Simulink qui fournissent les informations sur le terrain, les capteurs et les données véhicules.
- La fonction LSS avec les trois principaux sous-systèmes (ELK, LKA et LDW).
- Et la partie To SCANeR pour envoyer les données suivantes : To MADA<sup>7</sup>, Demande couple, consigne angle volant et vitesse latérale.



*Figure 13 : Architecture de la mil LSS*

Exigences techniques minimales du système :

Pour assurer une bonne exécution, le PC sur lequel la plate-forme va être installée doit avoir au moins les spécifications du système suivantes :

- Windows 7 / 10s 64bits.
- 16 Go Ram.
- Performances du GPU 1Go.
- Le droit d'administrateur est préférable.

Logiciels

En plus de ces exigences système, deux logiciels sont requis : SCANeR Studio 1.9r61 et Matlab Simulink R2016b installé (avec un système d'exploitation Windows7 /64bits))

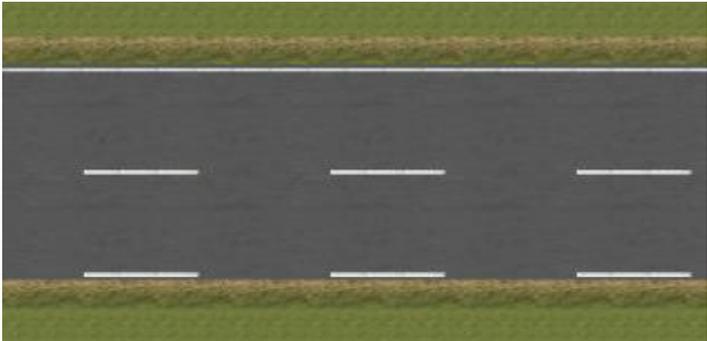
<sup>7</sup> Modèle dynamique numérique utilisé par les équipes Renault

### 3.2.1. Terrain (Environnement 3D)

Toutes les voies simulées ont une largeur maximale de 3.5m.

Terrain 1 :

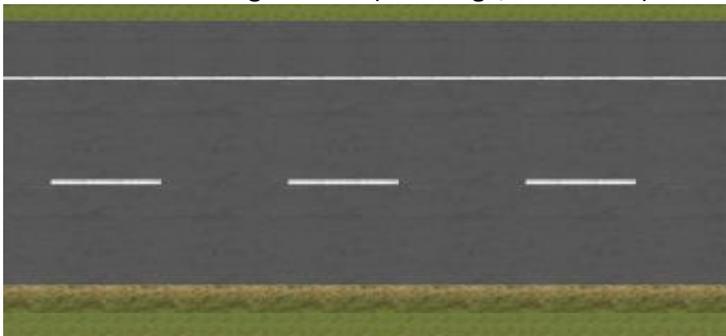
Marquage Left	Marquage Right	Description
Dashed	Dashed	(DashedRoadEdge/CentreLine)



*Figure 14 : Image du marquage pour les scénarios DashedRoadEdge\_CentreLine*

Terrain 2 :

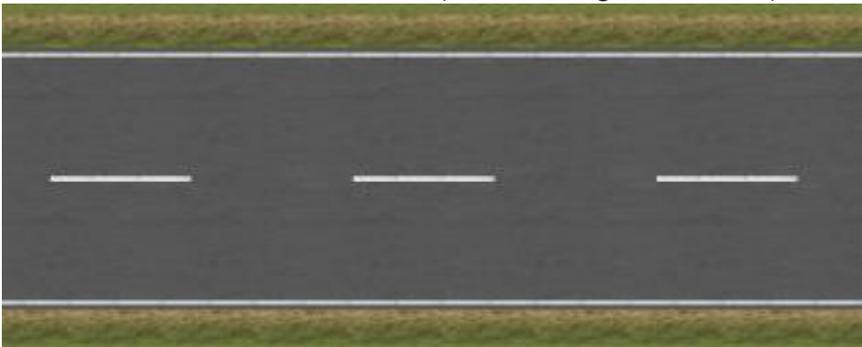
Marquage Left	Marquage Right	Description
Dashed	RoadEdge	(RoadEdge/CentreLine)



*Figure 15 : Image du marquage pour les scénarios RoadEdge\_CentreLine*

Terrain 3 :

Marquage Left	Marquage Right	Description
Dashed	Solid	(SolidRoadEdge / CentreLine)



*Figure 16 : Image du marquage pour les scénarios SolidRoadEdge\_CentreLine*

Terrain 4 :

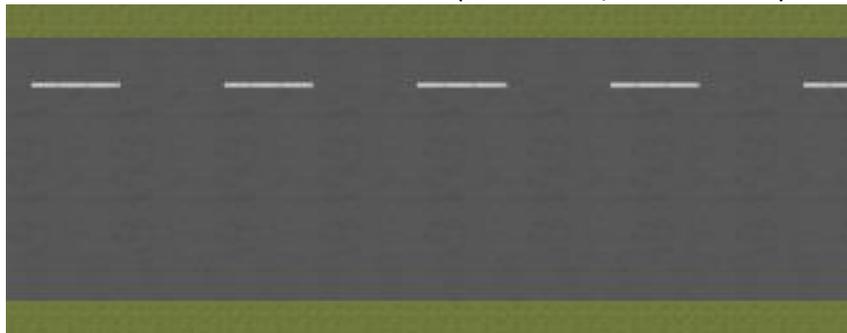
Marquage Left	Marquage Right	Description
Solid	None	(SolidLine/NoCentreLine)



*Figure 17 : Image du marquage pour les scénarios SolidLine\_NoCentreLine*

Terrain 5 :

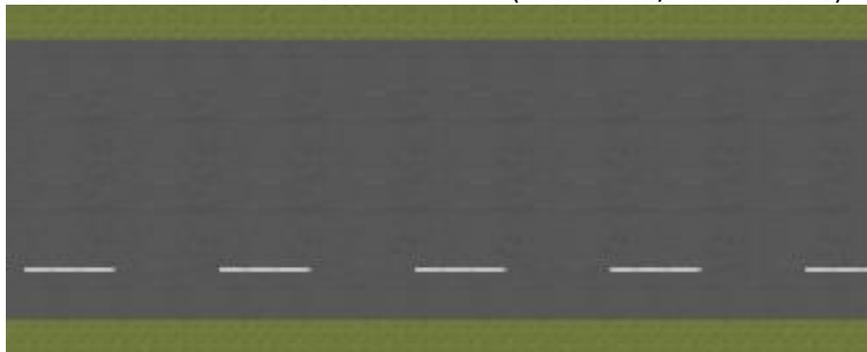
Marquage Left	Marquage Right	Description
Dashed	None	(DashedLine/NoCentreLine)



*Figure 18 : Image du marquage pour les scénarios DashedLine\_NoCentreLine*

Terrain 6 :

Marquage Left	Marquage Right	Description
None	Dashed	(DashedLine/NoCentreLine)



*Figure 19 : Image du marquage pour les scénarios DashedLine\_NoCentreLine*

Terrain 7 :

Marquage Left	Marquage Right	Description
None	Solid	(SolidLine/NoCentreLine)



Figure 20 : Image du marquage pour les scénarios SolidLine\_NoCentreLine

### 3.2.2. Véhicule

Le véhicule utilisé pour la simulation est un véhicule de type monospace avec les caractéristiques statiques ci-dessous :



Figure 21 : Véhicule 3D utilisé pour les simulations

#### Châssis :

- Longueur totale (mm) = 4487
- Largeur totale (mm) = 1810
- Hauteur totale (mm) = 1826
- Poids (kg) = 1810
- Empattement (mm) = 2716
- Hauteur de caisse (mm) = 211
- Voie avant (mm) = 1536
- Voie arrière (mm) = 1532
- Porte à faux arrière (mm) = 810

#### Roues :

Radium des pneus (mm) = 297

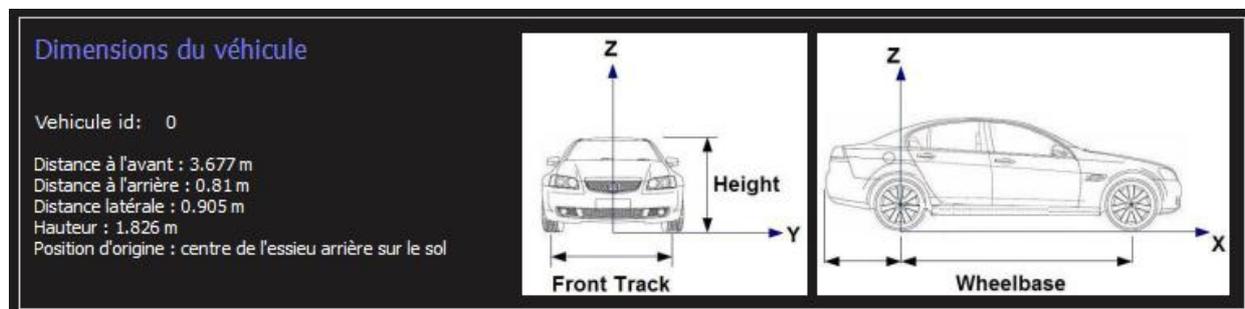
#### - Modèle numérique du véhicule

Le modèle numérique du véhicule est une boîte noire.

### 3.2.3. Capteurs

La simulation s'effectue avec 2 capteurs, une caméra avant et deux Radars (Arrière gauche/Arrière droit).

Pour détailler la position de chaque capteur dans le véhicule, il faut spécifier le référentiel du véhicule :



*Figure 22 : Paramètres du véhicule particulier dans SCANeR™ studio*

#### Camera :

La position (dans le référentiel du véhicule) de la caméra focale dans le véhicule est la suivante :

$X = 1.87\text{m}$

$Y = 0\text{m}$

$Z = 1.371\text{m}$

#### Radar :

La position (dans le référentiel du véhicule) des deux radars est la suivante :

##### Radar arrière gauche :

$X = -0.451\text{m}$

$Y = 0.784\text{m}$

$Z = 0.458\text{m}$

Orientation Cap =  $120^\circ$  (relative à l'orientation véhicule)

Tangage  $0^\circ$

Roulis  $0^\circ$

##### Radar arrière droit :

$X = -0.451\text{m}$

$Y = -0.784\text{m}$

$Z = 0.458\text{m}$

Orientation Cap =  $-120^\circ$  (relative à l'orientation véhicule)

Tangage  $0^\circ$

Roulis  $0^\circ$

#### - Modèle numérique du capteur utilisé

Le modèle numérique des capteurs est détaillé dans l'annexe.

### 3.2.4. Autonomous Driver

Pour la partie « conducteur autonome », le modèle n'a pas été mis à disposition aux pilotes de tâche pour intégration dans la méthodologie de simulation et il est considéré comme une boîte noire.

## 3.3. Corrélation

Les données issues du roulage ont été prétraitées et préparées pour permettre d'étudier la corrélation entre les tests de roulages réels et les tests de roulages simulés

(iso-unité, synchronisation des signaux, filtrages, interpolations linéaires...) tout en respectant les normes du protocole "LSS EuroNCAP". Tous ces traitements ont été réalisés afin d'obtenir des signaux (réels/simulés) qui peuvent être comparés pour le calcul des indicateurs/métriques de corrélation mentionnés dans la section "2.3".

Les résultats seront illustrés dans les figures suivantes incluant chacune incluent quatre paramètres ('Yaw Angle', 'Lateral Speed', 'DTLE', 'Camera Right/Left') pour les trois sous-systèmes du "LSS". Les différents scores de corrélation obtenus sont détaillés dans les tableaux de corrélation ci-après. Ces scores sont calculés pour chaque scénario en comparant le signal de simulation avec le signal moyen des différents tests réels. Les scores sont exprimés en pourcentage et sont compris entre 0% et 100% un fort score indique une corrélation parfaite.

Ci-dessous sont présentés les résultats de six comparaisons de tests parmi les 32 étudiés<sup>8</sup>.

---

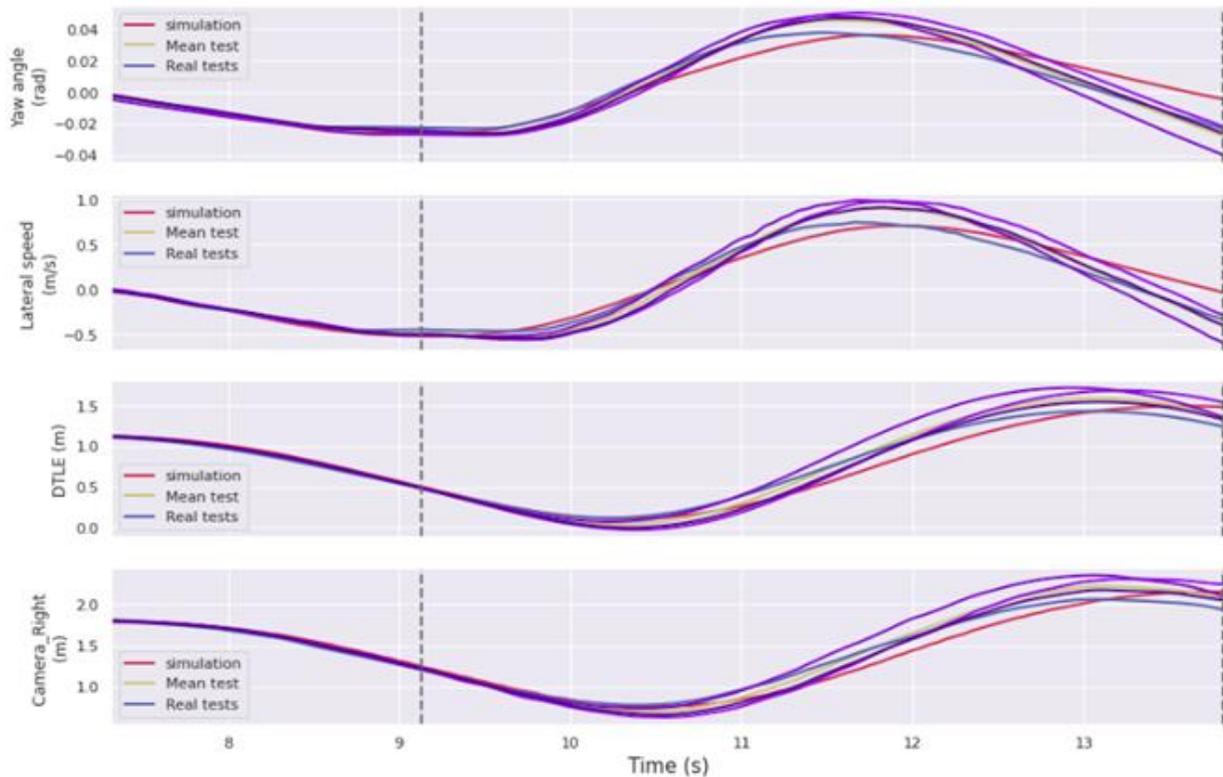
<sup>8</sup> Dans le cadre de cette tâche, 32 tests ont été analysés et traités, leur publication dans ce livrable devrait faire l'objet d'autorisation auprès de notre partenaire (Renault).

ELK SolidRoadEdge Centreline PassengerSide 05mps:

Direction : Droite

Type de marquage à gauche : Dashed line

Type de marquage à droite : Solid line



*Figure 23 : ELK SolidRoadEdge Centreline PassengerSide 05mps signals*

	Indicators/Metrics	Yaw angle	Lateral speed	DTLE	Camera Right
0	I	98.21	98.25	100	98.85
1	A	79.24	78.77	38.21	92.29
2	P	68.31	73.12	86.04	92.71
3	E	79.96	80.74	90.25	95.87
4	-	-	-	-	-
5	Discrete Fréchet distance	68.1	74.08	84.3	84.68
6	Frequency_components_comparison_error	98.45	98.55	99.59	99.79
7	DTW	80.6	84.31	87.26	87.11
8	Spearman correlation	94.32	96.87	97.57	97.79

*Figure 24 : ELK SolidRoadEdge Centreline PassengerSide 05mps correlation table*

ELK RoadEdge\_Centreline\_PassengerSide\_05mps :

Direction : Droite

Type de marquage à gauche : Dashed line

Type de marquage à droite : Road Edge

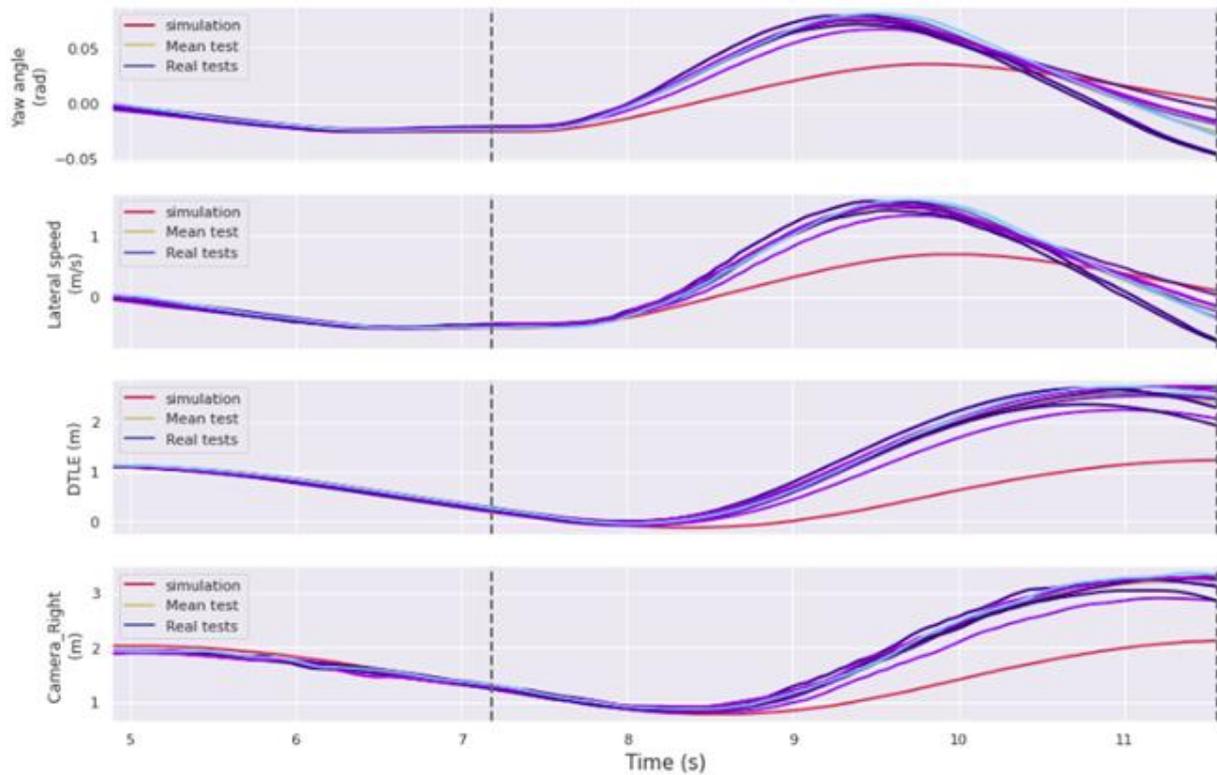


Figure 25 : ELK RoadEdge\_Centreline\_PassengerSide\_05mps signals

	Indicators/Metrics	Yaw angle	Lateral speed	DTLE	Camera Right
0	I	96.02	95.52	95.93	99.88
1	A	47.36	47.04	29.39	90.4
2	P	49.55	53.2	44.27	72.28
3	E	72.57	75.63	63.83	84.79
4	-	-	-	-	-
5	Discrete Fréchet distance	55.16	56.9	45.36	52.02
6	Frequency_components_comparison_error	97.03	97.08	97.51	98.94
7	DTW	67.96	75.32	46.54	48.49
8	Spearman correlation	91.09	95.69	80.27	83.31

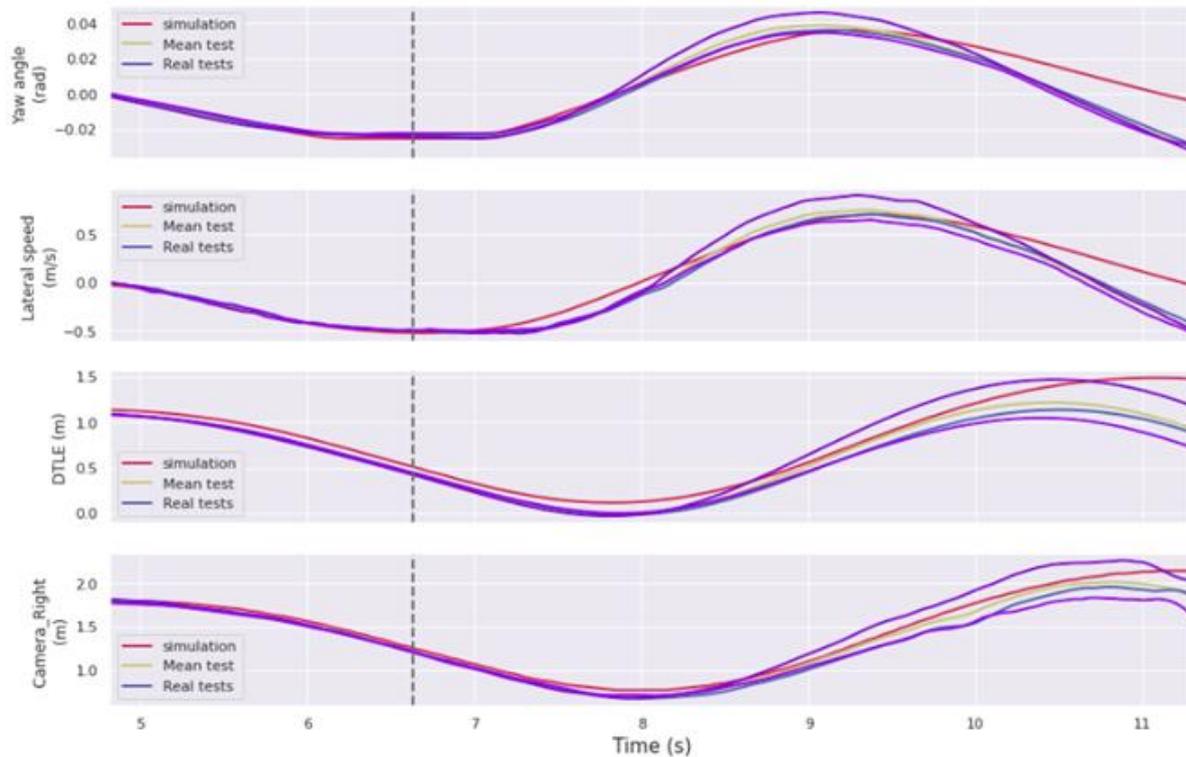
Figure 26 : ELK RoadEdge\_Centreline\_PassengerSide\_05mps correlation table

ELK DashedRoadEdge Centreline PassengerSide 05mps:

Direction : Droite

Type de marquage à gauche : Dashed line

Type de marquage à droite : Dashed line



*Figure 27 : ELK DashedRoadEdge Centreline PassengerSide 05mps signals*

	Indicators/Metrics	Yaw angle	Lateral speed	DTLE	Camera Right
0	I	98.27	98.53	99.24	99.12
1	A	92.3	93.74	0	89.36
2	P	67.54	71.71	79.19	95.05
3	E	79.03	76.96	77.48	95.56
4	-	-	-	-	-
5	Discrete Fréchet distance	62.35	64.87	63.72	79.45
6	Frequency_components_comparison_error	98.25	98.38	99.35	99.82
7	DTW	77.26	82.44	86.38	94.87
8	Spearman correlation	91.2	96.05	97.35	99.54

*Figure 28 : ELK DashedRoadEdge Centreline PassengerSide 05mps correlation table*

LKA DashedLine NoCentreline PassengerSide 05mps :

Direction : Droite

Type de marquage à gauche : None

Type de marquage à droite : Dashed line

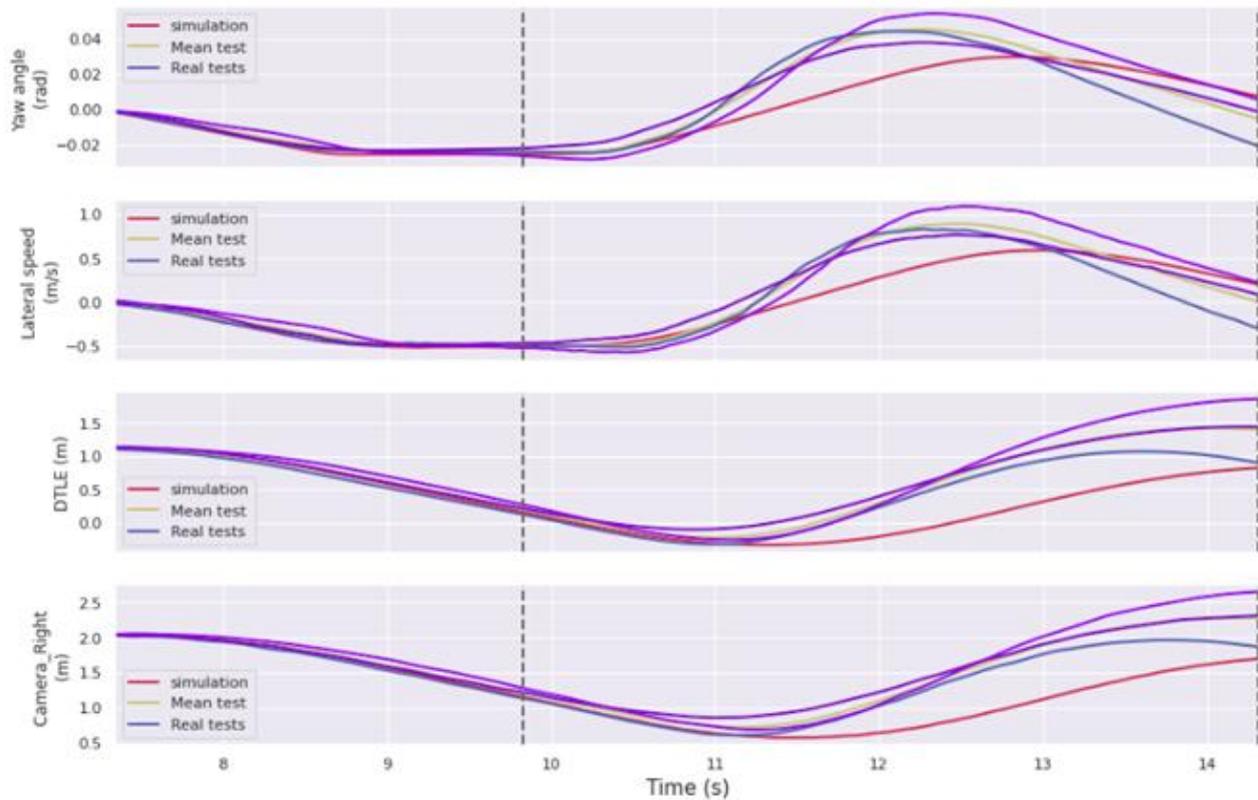


Figure 29 : LKA DashedLine NoCentreline PassengerSide 05mps signals

	Indicators/Metrics	Yaw angle	Lateral speed	DTLE	Camera Right
0	I	95.86	96.23	97.17	98.41
1	A	65.74	66.3	66.69	79.17
2	P	59.7	63.84	51.83	74.72
3	E	76.26	78.24	62.72	83.35
4	-	-	-	-	-
5	Discrete Fréchet distance	64.08	67.85	57.18	56.86
6	Frequency_components_comparison_error	98.7	98.7	98.12	99.28
7	DTW	76.84	80.9	53.93	53.71
8	Spearman correlation	92.05	94.19	81.23	81.11

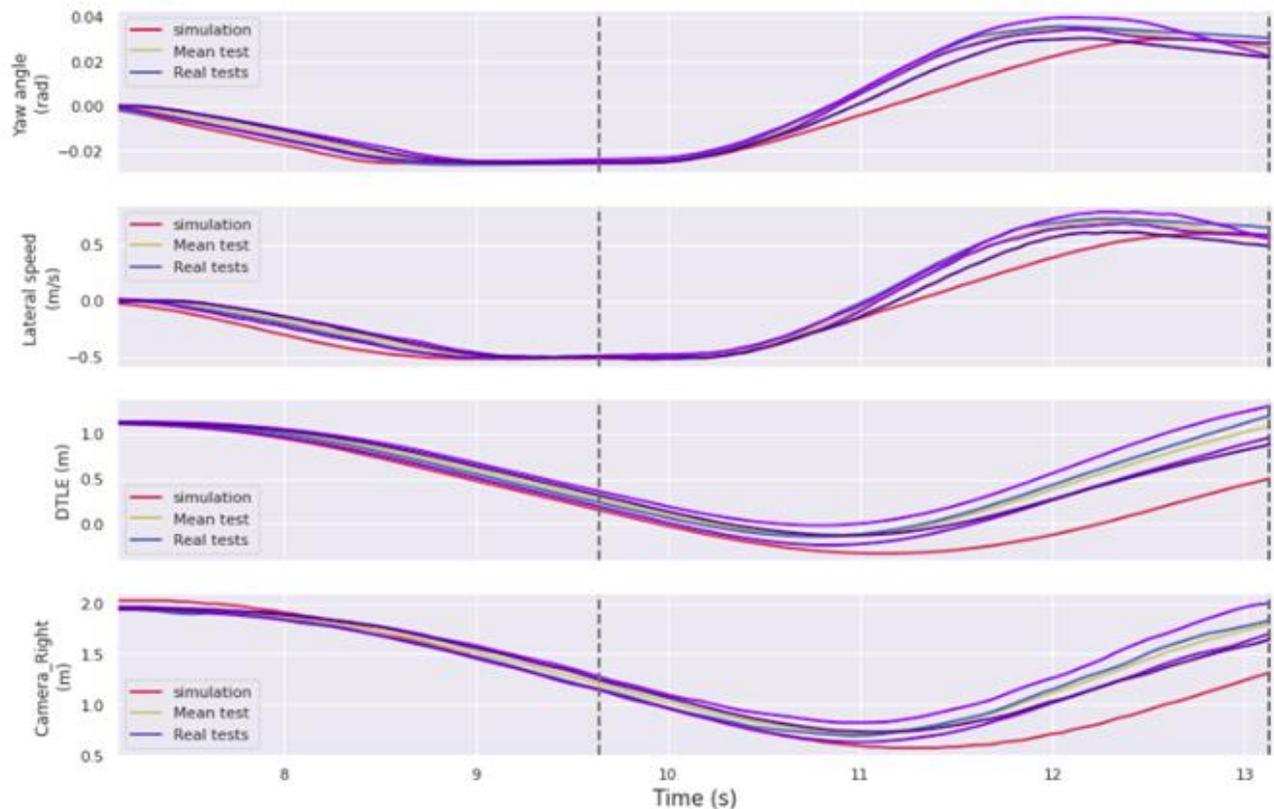
Figure 30 : LKA DashedLine NoCentreline PassengerSide 05mps correlation table

LKA SolidLine NoCentreline PassengerSide 05mps :

Direction : Droite

Type de marquage à gauche : None

Type de marquage à droite : Solid line



*Figure 31 : LKA SolidLine NoCentreline PassengerSide 05mps signals*

	Indicators/Metrics	Yaw angle	Lateral speed	DTLE	Camera Right
0	I	96.35	96.41	97.57	98.57
1	A	85.87	85.06	39.51	79.33
2	P	69.27	69.95	53.65	81.49
3	E	74.65	72.91	55.26	87.1
4	-	-	-	-	-
5	Discrete Fréchet distance	75.14	78.47	59.81	66.94
6	Frequency_components_comparison_error	98.49	98.56	97.94	99.42
7	DTW	87.2	88.73	71.52	74.24
8	Spearman correlation	95.84	96.87	93.03	93.99

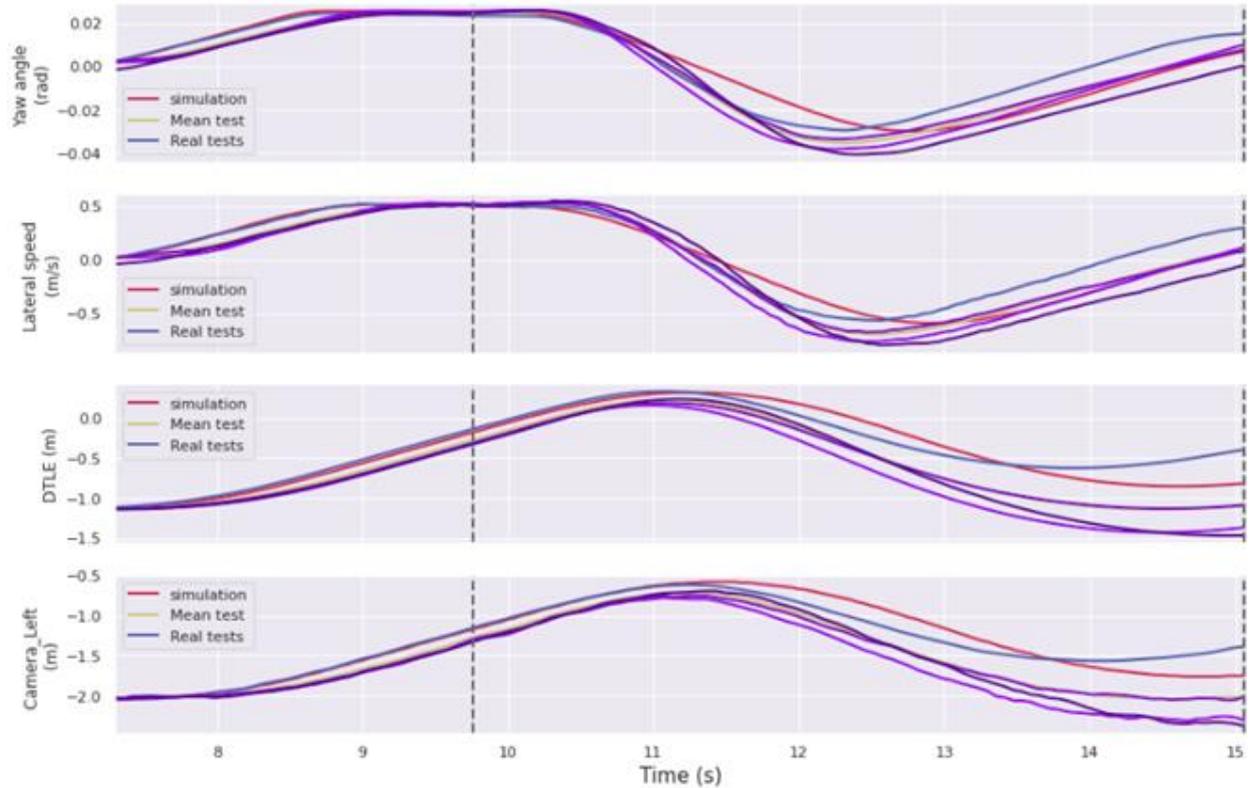
*Figure 32 : LKA SolidLine NoCentreline PassengerSide 05mps correlation table*

LKA DashedLine NoCentreline DriverSide 05mps :

Direction : Gauche

Type de marquage à gauche : Dashed line

Type de marquage à droite : None



*Figure 33 : LKA DashedLine NoCentreline DriverSide 05mps signals*

	Indicators/Metrics	Yaw angle	Lateral speed	DTLE	Camera Left
0	I	96.71	97.74	98.49	99.91
1	A	84.36	84.68	71.05	80.95
2	P	72.26	76.41	65.74	83.38
3	E	81.13	82.94	65.55	86.29
4	-	-	-	-	-
5	Discrete Fréchet distance	77.95	81.95	74.07	72.45
6	Frequency_components_comparison_error	99.02	98.97	98.77	99.49
7	DTW	85.51	86.98	78.89	77.55
8	Spearman correlation	95.79	96.31	94.28	94.34

*Figure 34 : LKA DashedLine NoCentreline DriverSide 05mps correlation table*

### 3.4. Conclusion

À ce stade d'avancement et à partir de l'analyse des courbes et des tableaux de corrélation obtenus pour les différents scénarios traités, on peut conclure que pour la plupart des cas, les résultats de corrélation pour les indicateurs/métriques (méthode IAPE, distance de Fréchet, Fourier, DTW, corrélation de Spearman) calculés sont pertinents pour les trois sous-systèmes de LSS en effet, ces derniers varient dans l'intervalle (65%-->99%). Sachant que pour certains paramètres le faible score de corrélation obtenu pour certains indicateurs n'est pas lié à la dissimilarité totale ou la non-corrélation entre test réel et simulation, mais plutôt il est associé à la façon (i.e. formule mathématique) avec laquelle cet indicateur traite un aspect spécifique entre les deux courbes (e.g. l'indicateur A avec le paramètre DTLE).

C'est pour cette raison qu'on utilise une technique qui se base sur le calcul de plusieurs métriques/indicateurs pour avoir le plus d'information possible sur la corrélation entre les deux courbes (test réel et simulation).

Bien qu'ils expriment une corrélation significative, les différents scores (méthode IAPE, distance de Fréchet, Fourier, DTW, corrélation de Spearman) restent perfectibles.

La prochaine étape de l'étude porte sur l'agrégation des indicateurs (méthode IAPE, distance de Fréchet, Fourier, DTW, corrélation de Spearman) en un seul score global interprétable et la fixation d'un seuil à partir duquel on peut affirmer que nos résultats sont bien corrélés. Néanmoins la validation des résultats obtenus dépend du nombre de scénarios joués. Dans le cas de ce livrable intermédiaire celui-ci est trop faible

## 4. POC : navette autonome

### 4.1. Cas d'usage

- **Scénarisation des uses cases «Alerte Piéton»**

Scénarisation du use case freinage sur piéton a été basé sur les tests NCAP. Le protocole d'essais pour la validation du système AEB Piéton comporte les scénarios suivants :

- **(CPFA-50)** Car-to-Pedestrian Farside Adult 50%
- **(CPNA-25)** Car-to-Pedestrian Nearside Adult 25%
- **(CPNA-75)** Car-to-Pedestrian Nearside Adult 75%
- **(CPNC-50)** Car-to-Pedestrian Nearside Child 50%
- **(CPLA-25)** Car-to-Pedestrian Longitudinal Adult 25%
- **(CPLA-50)** Car-to-Pedestrian Longitudinal Adult 50%



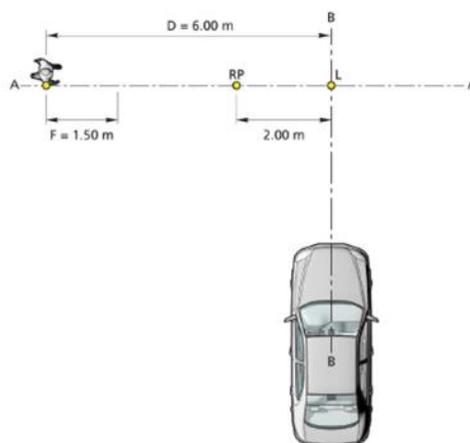
EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME  
(Euro NCAP)



TEST PROTOCOL – AEB VRI (1510000)

Version 3.2.1  
February 2019

Dans ce paragraphe nous traitons le protocole du scénario **CPFA-50**, une collision dans laquelle un véhicule avance vers un piéton adulte traversant en courant et la structure frontale du véhicule heurte le piéton à 50 % de la largeur du véhicule lorsqu'aucune action de freinage n'est appliquée.



*Figure 35 : Car-to-Pedestrian Farside Adult 50%*

#### Axes

AA – Trajectoire du piéton (trajectoire du point H du mannequin)

BB – Axe de la ligne centrale du véhicule testé

#### Distances :

D – Distance entre la position initiale du point H du mannequin et le point l'impact 50%

F – Distance d'accélération du mannequin

#### Points :

L – Position d’impact pour les scenarios 50 %

RP – Point de référence (point H du mannequin)

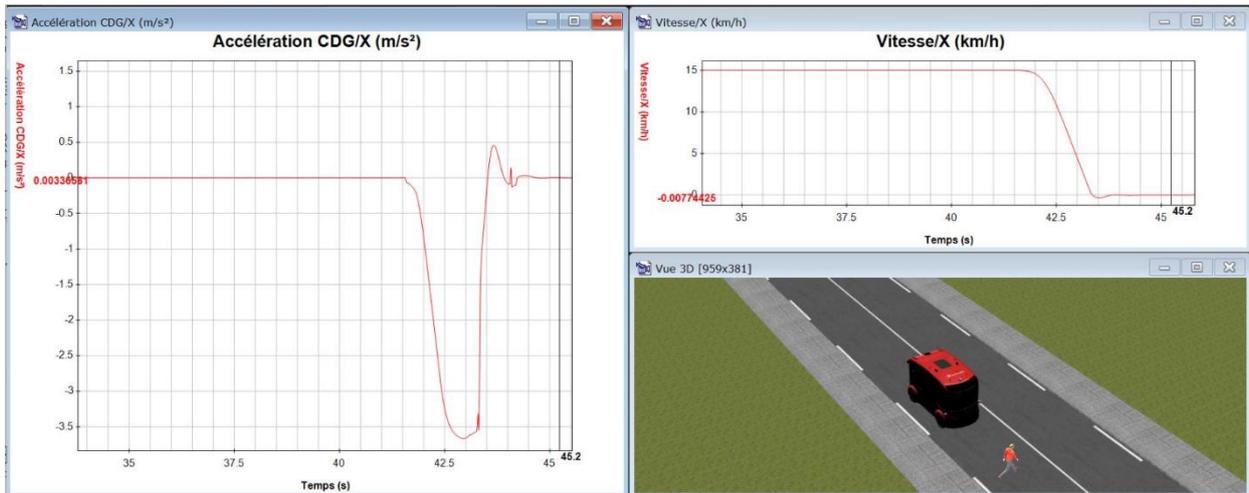
La transcription du scénario dans le script de SCANeR est répartie en trois scènes principales :

- Calcul de la position du point d’impact et positionnement de l’EGO, en effet l’appel de « l’Include ImpactPoint » dans le script permet de calculer la position du point l’impact en fonction des dimensions de l’EGO (la voie du véhicule dans ce cas)
- Positionnement de piéton, en effet la distance longitudinale entre le piéton et l’EGO dépend respectivement des vitesses de l’EGO et du piéton. Le script Time\_Ped permet de positionner le piéton en fonction du temps nécessaire à respecter le point d’impact en prenant en compte les vitesses de l’EGO et du piéton.
- Activation du piéton, en effet le flag d’activation du piéton est enclenché une fois que la condition suivante est respectée : temps nécessaire pour atteindre le point d’impact (Time\_Ped) est inférieurs au temps restant à l’EGO pour arriver au point L au cours de la simulation.

Le scénario **CPFA-50** est développé d’une manière à ce qu’il constitue une trame générique permettant de créer l’ensemble des scénarios Pedestrian du protocole NCAP. Environ 50 scénarios pouvant être créé à l’aide de l’outil SCANeR Explorer.

Ci-après une synthèse des scénarios Pedestrian disponibles :

<b>Sce Pedestrian</b>	<b>CPFA</b>	<b>CPNA</b>	<b>CPNC</b>	<b>CPLA</b>	
VUT speed [km/h]		10-60		20-60	50-80
VUT direction		Forward		Forward	Forward
Target speed [km/h]	8	5		5	5
Impact location [%]	50	25,75	50	50	25
Lighting condition	Day	Day/Night	Day	Day/Night	
Vehicle lights (night)		Low beam		High beam	
Streetlights (night)		Streetlights		No streetlights	



*Figure 36 : Simulation use case "pedestrian detection"*

○ **Scénarisation des uses cases Car to Car Rear Breaking et Cut-in**

Dans le cadre des travaux de la tâche 2.4., Transdev a mis à disposition des logs d'essais pour les scénarios suivants :

- **CCRB** : Freinage d'urgence de la navette autonome sur un véhicule arrêté (freinant) sur la voie
- **Cut-in** : Freinage d'urgence de la navette autonome sur un véhicule en insertion sur la voie

Les mesures comportent des grandeurs physiques concernant l'EGO (la navette testée) et la Target (Tracking Object)

Target :

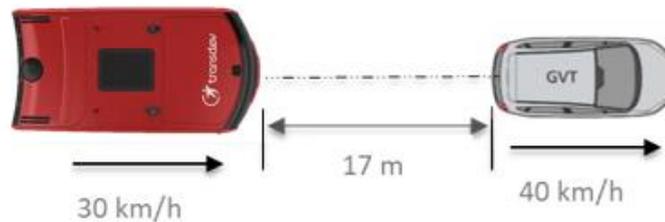
Replay Timestamp	Objet (véhicule)								
	Timestamp réel (ms)	Pos X (mètre)	Pos Y (mètre)	Posi Z (mètre)	Vitesse X (ms)	Vitesse Y (ms)	Accel X (ms <sup>2</sup> )	Accel Y (ms <sup>2</sup> )	Incidence (1 = oui, 2 = non)

Navette :

Véhicule (DANS LE REPERE ABSOLU)								
Time réel (ms)	Pos_x (m)	Pos_y (m)	Speed_x (m/s)	accel_longi_abs (m/s <sup>2</sup> )	couple_freinage AD (Nm)	couple_freinage VSC (Nm)	couple_accel AD (Nm)	couple_accel VSC (Nm)

○ Scénario **CCRb** :

Le protocole d'essais consiste à tester une collision dans le cas où la navette avance à vitesse constante vers un véhicule qui roule à vitesse constante puis décélère jusqu'à l'arrêt sur la même voie



Les conditions d'essais nécessaires à construction du scénario simulable sont extraites à partir des logs tracking objects

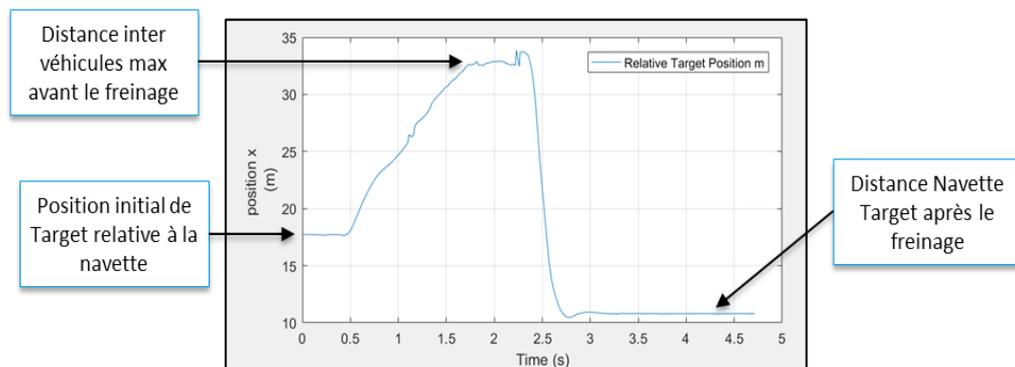


Figure 37 : Position longitudinale de la Target relative à navette scénario CCRb

Le scénario simulable est construit sous SCANeR selon le déroulement suivant :

- Affectation des positions et les vitesses initiales de l'EGO et la Target
- Calcul de l'écart (distance longitudinal) inter-véhicule au cours de la simulation
- Activation de la Target une fois l'écart inter-véhicule est supérieurs ou égale à 17 m (valeur extraite de l'essai)
- Application d'une décélération de  $-6 \text{ m/s}^2$  à la Target après 5s de son activation

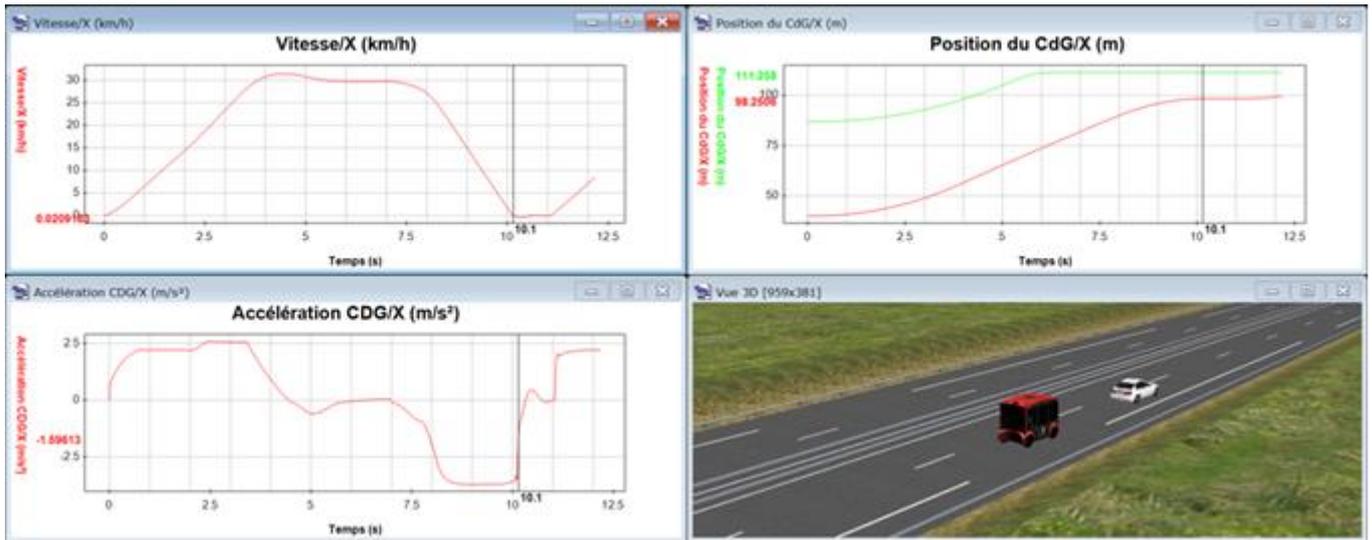


Figure 38 : résultat simulation de scénario CCRb

○ Scénario **Cut-in** :

Le protocole d'essais consiste à tester une collision dans le cas où la navette avance à vitesse constante vers un véhicule arrêté sur la 2ème voie puis inséré sur la voie principale en continuant à rouler à vitesse constante.

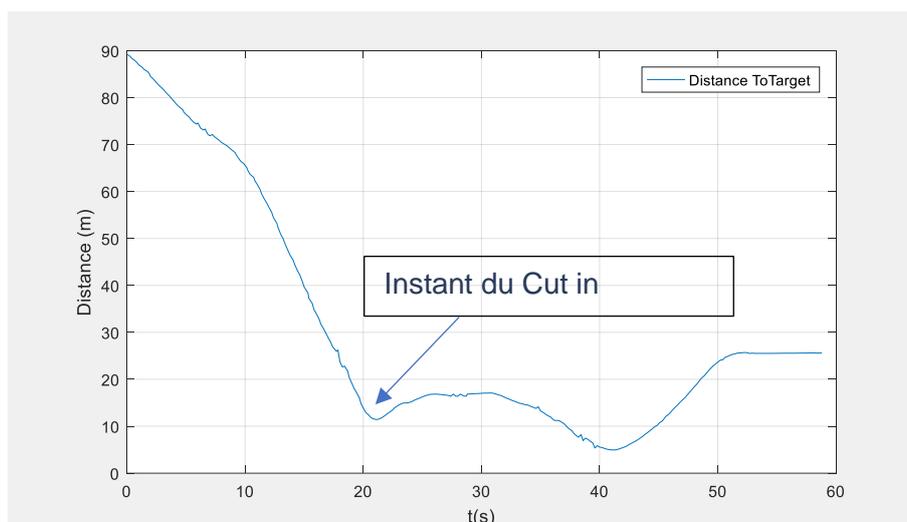
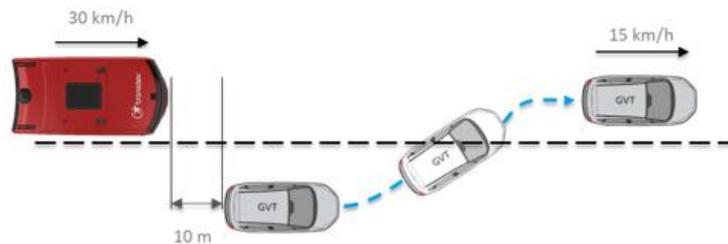
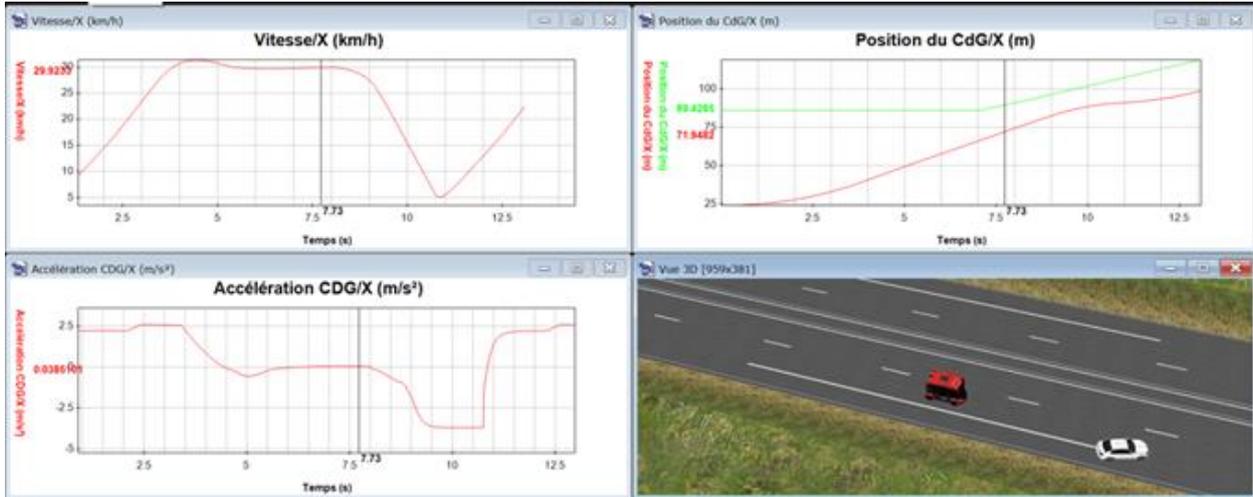


Figure 39 : Distance du véhicule cible par rapport à la navette

Le scénario simulable est construit sous SCANer selon le déroulement suivant :

1. Affectation des positions et les vitesses initiales de l'EGO et la Target
2. Calcul de l'écart (distance longitudinale) inter-véhicule au cours de la simulation
3. Activation de la Target une fois l'écart inter-véhicule est supérieur ou égal à 10 m (valeur extraite de l'essai)
4. Insertion de la Target sur la voie principale

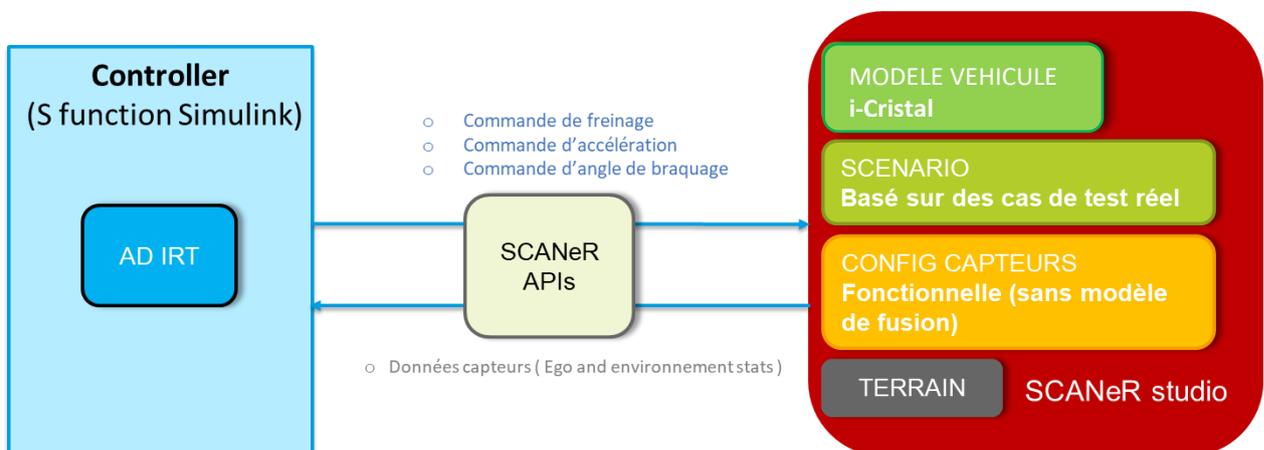


*Figure 40 : Résultats de simulation du scénario de cut-in*

## 4.2. Plateforme de simulation

Pour la simulation de la navette autonome, nous utilisons la plateforme de simulation SCANer Studio qui permet de simuler le comportement de la navette dans son environnement ainsi que les éléments extérieurs : la route, les véhicules du trafic les piétons, mais aussi la configuration des capteurs permettant de simuler la détection de l'environnement. Le système de gestion de la navette est le POC décrit dans le paragraphe Autonomous Driver (AD).

La figure ci-dessous récapitule l'architecture de la plateforme de simulation.



*Figure 41 : Plateforme de simulation fonctionnelle*

#### 4.2.1. Terrain (Environnement 3D)

Les terrains utilisés en simulation respectent le protocole NCAP

Terrain 1 :

Marquage Left	Marquage Right	Description
Dashed	Solid	(SolidRoadEdge / CentreLine)

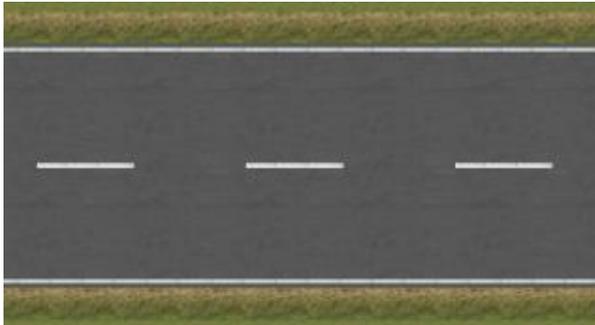


Figure 42 : Image du marquage SolidRoadEdge CentreLine pour le scénario 1

Terrain 2 :

Marquage Left	Marquage Right	Description
Solid	Solid	(SolidRoadEdge / CentreLine)

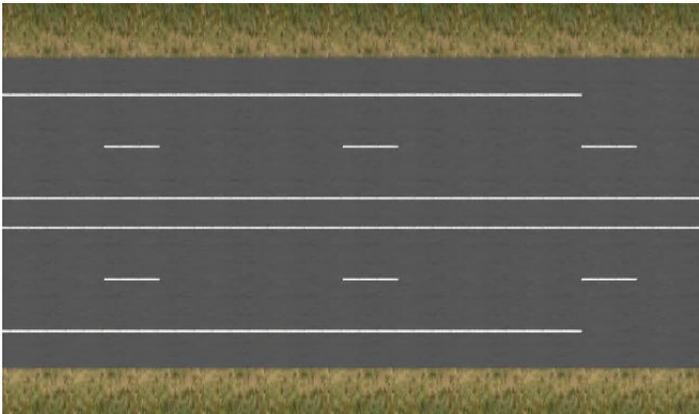


Figure 43 : Image du marquage SolidRoadEdge pour le scénario 2

#### 4.2.2. Véhicule

Le modèle de la dynamique véhicule que nous avons utilisé en simulation est un modèle CALLAS fournis par l'équipe simulation de la société Transdev. Le modèle est à priori représentatif de la navette utilisée lors des essais physiques.

Le modèle véhicule est paramétré selon la configuration suivante :

- Chassis : iCristal\_callas\_v2
- Transmission : Electric transmission
- Steering : Direction icristal
- Aerodynamics : Aero SCd 0.7

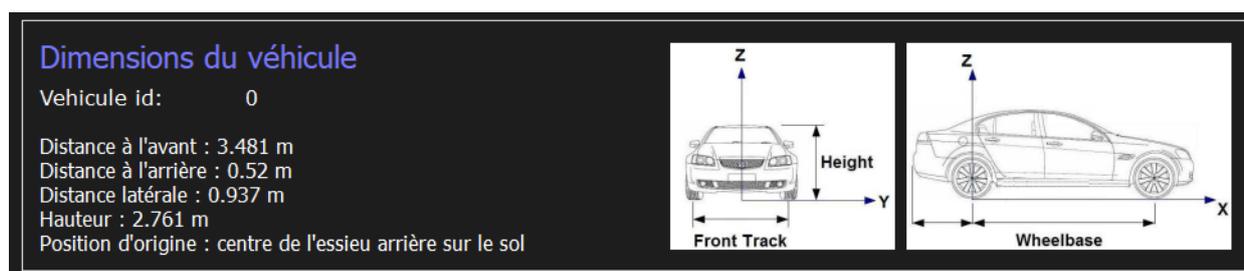
- Brakes : ABS ESP
- Tires :
  - 195-65r15\_callas / 195-65r15\_callas
  - 195-65r15\_callas / 195-65r15\_callas
- Suspensions :
  - Train McPherson avant /arrière
- Electric engine : FWD 80kW

On s'est intéressé à ce stade de l'étude au comportement longitudinale notamment la dynamique de la navette en freinage. La norme ISO/CD 22179 impose à un véhicule de transport public que l'accélération moyenne automatique du véhicule n'excède  $2 \text{ m/s}^2$  (moyenne sur 2 s) quand le véhicule hôte roule à une vitesse supérieure ou égale à  $20 \text{ m/s}$  ( $70 \text{ km/h}$ ) et de  $4 \text{ m/s}^2$  (moyenne sur 2 s) quand le véhicule hôte roule à une vitesse inférieure ou égale à  $5 \text{ m/s}$  ( $20 \text{ km/h}$ ). Ci-après le paramétrage du système du freinage de navette

- Equivalent à la Force maximale à la pédale (daN) : 40
- Efficacité du freinage
  - Equivalent à la pression en fonction de la force à la pédale (bar\daN) : 2,5
  - Couple du freinage en fonction de la pression (bar\daN.m) : 2.7

### 4.2.3. Capteurs

Nous avons effectué les simulations avec un modèle équivalent de perception capteur composé de deux caméras avant et arrière paramétrés selon les spécifications Mobileye 8. La position de chaque capteur est spécifiée par rapport au référentiel du véhicule :



*Figure 44 : Paramètres de la navette dans SCANeR<sup>TM</sup>studio*

#### Camera avant :

La position (dans le référentiel du véhicule) de la caméra focale dans le véhicule est la suivante :

$X = 3.4\text{m}$

$Y = 0\text{m}$

$Z = 1.4\text{m}$

#### Camera arrière :

La position (dans le référentiel du véhicule) de la caméra focale dans le véhicule est la suivante :

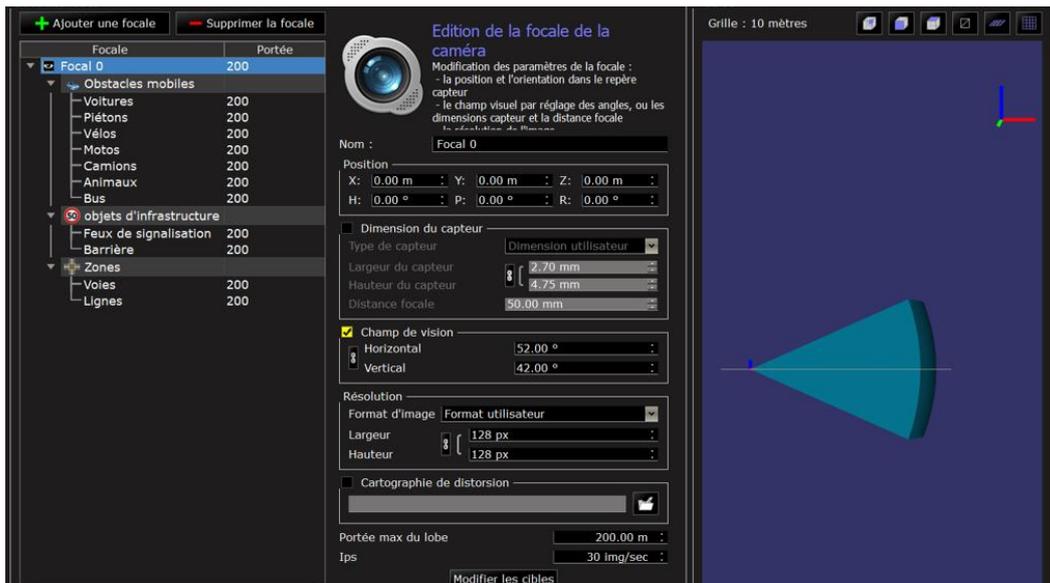
$X = -0.3\text{m}$

$Y = 0\text{m}$

$Z = 0,75\text{m}$

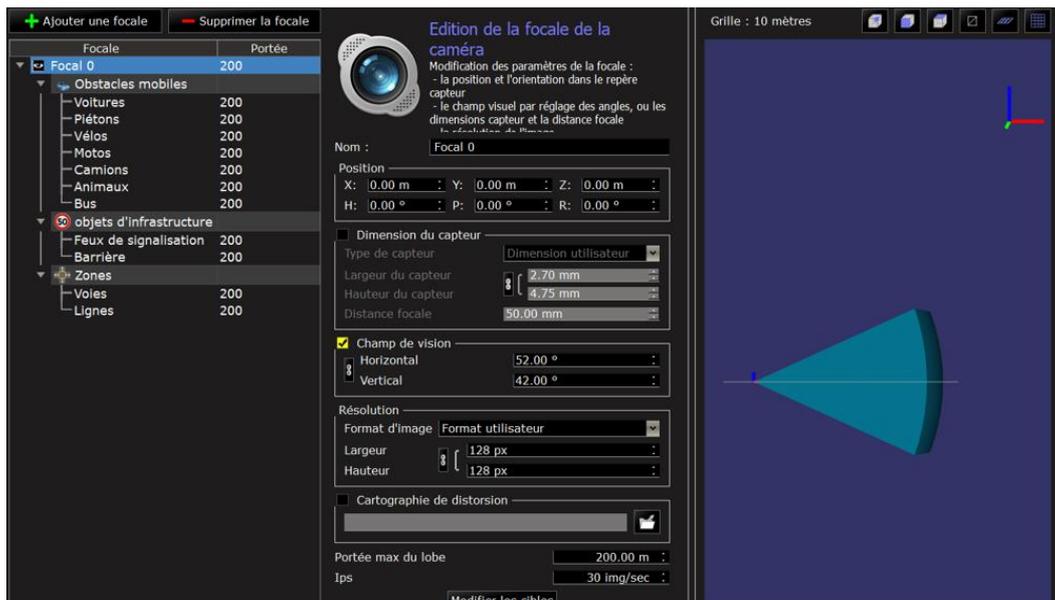
## - Modèles numériques utilisés

### Caméra avant



*Figure 45 : Description de la caméra avant dans SCANeR™ studio*

### Caméra arrière



*Figure 46 : Description de la caméra arrière dans SCANeR™ studio*

#### 4.2.4. Autonomous Driver (AD)

Le système de conduite autonome de la navette utilisé dans le projet SAM est une version adaptée du POC développé dans le cadre du projet SVR à l'IRT SystemX [Référence : SVR ISX-SVR-LIV-1122].

Le système gère le mouvement de la navette pour accomplir sa mission de transport de passager sur un parcours prédéfini. Pour assurer sa mission le système doit gérer :

- Le suivi de sa trajectoire : la gestion du contrôle longitudinal et latéral ;
- Les arrêts :
  - Desservir les stations ;
  - Arrêt feux tricolores ;
  - La barrière...etc.
- Les obstacles statiques et dynamiques :
  - Les autres véhicules sur la chaussée
  - Les cyclistes ;
  - Les piétons...etc. ;

Pour ce, le système s'appuie sur les capteurs externes pour se localiser et localiser la route et les objets autour de la navette.

La figure ci-dessous (Figure 47 : Architecture du système [SVR ISX-SVR-LIV-1122]) donne l'architecture de système de conduite de la navette.

- La Supervision STPA : gère le service du transport autonome STPA
- La Supervision : locale gère les états opérationnels de la navette
- La Perception : représente le modèle de l'environnement de la conduite
- La Localisation : localise la navette dans le terrain
- La Décision : précise une ou des décisions selon la situation de conduite et calcule la trajectoire court terme correspondant à la décision
- Le Contrôle des actionneurs : calcule les consignes pour les actionneurs de la navette : l'accélérateur, le freinage, le braquage et les clignotants.

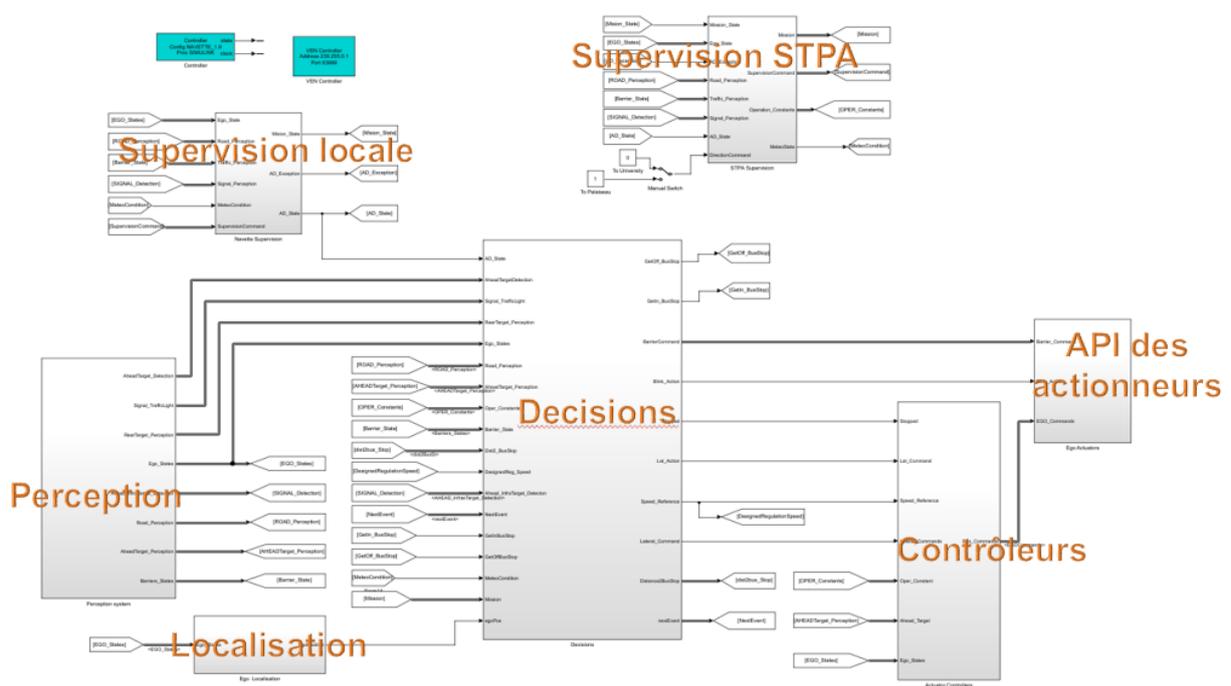


Figure 47 : Architecture du système [SVR ISX-SVR-LIV-1122]

### 4.3. Corrélation

Dans l’objectif d’améliorer la représentativité de la plateforme de simulation par rapport au contrôle longitudinale de la navette notamment sur des scénarios du freinage d’urgence. Un modèle permettant la conversion du couple du freinage (issu de la loi de commande) en pression hydraulique dans systèmes de freinage est intégré à l’architecture du contrôle de la navette via le POC.

La dynamique de la montée en pression dans le système du freinage est modélisée comme une fonction de transfert configurable via les deux paramètres :

- La latence en (s) : Quelques millisecondes modélisant la phase transitoire de la montée en pression pendant lequel la pression reste nulle après l’ordre du freinage
- Time to 100 bars (s) : Le temps que le système du freinage mettra pour atteindre 100 bars

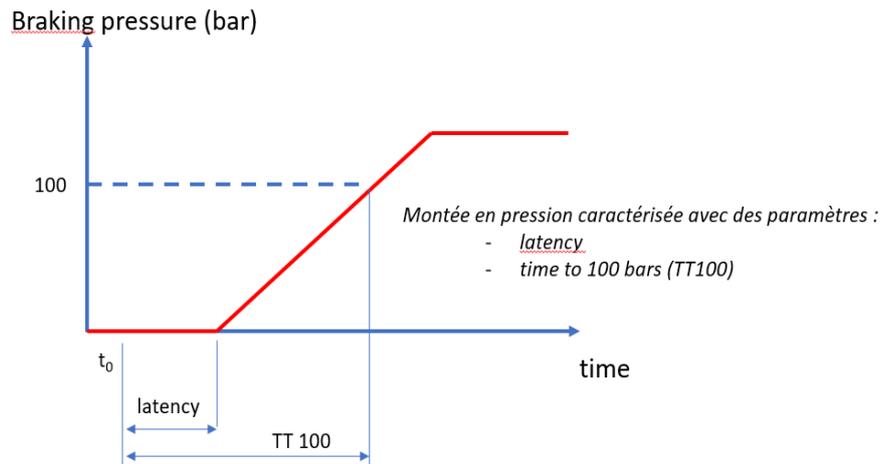


Figure 48 : courbe d'évolution de la pression dans le système de freinage

Une comparaison des résultats de simulation par rapport aux essais est réalisée afin d'évaluer la représentativité de la plateforme de simulation

o Scénario **CCRb**

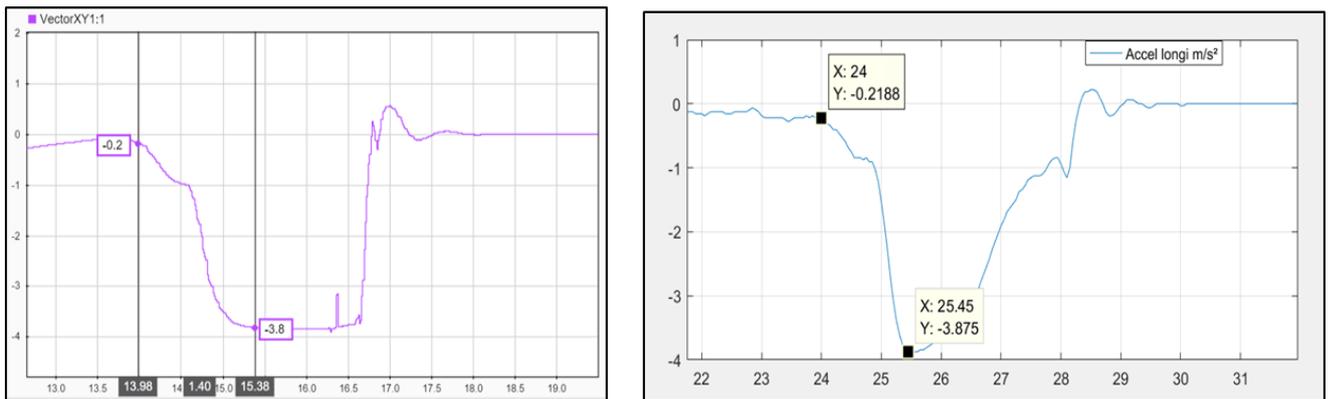
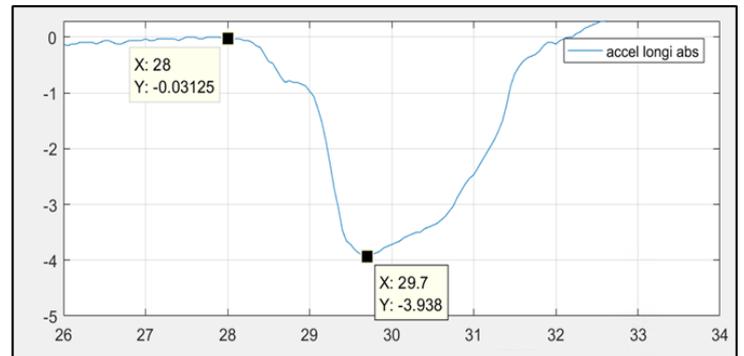
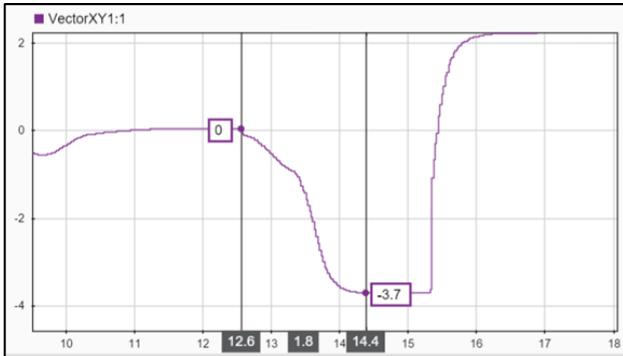


Figure 49 : profil de la décélération de la navette pendant le freinage simulation (gauche) vs essai (droite)

La comparaison est réalisée sur la base des grandeurs suivantes :

	Simulation	Essai physique
<b>Décélération max</b>	<b>-3,80 m/s<sup>2</sup></b>	<b>-3,87 m/s<sup>2</sup></b>
<b>Temps à la décélération max</b>	<b>1,40 s</b>	<b>1,45 s</b>
<b>Distance Navette Target après le freinage</b>	<b>11,9 m</b>	<b>10,8 m</b>

○ Scénario **Cut-in**



*Figure 50 : profile de la décélération de la navette pendant le freinage simulation (gauche) vs essai (droite)*

	Simulation	Essai physique
<b>Décélération max</b>	<b>-3,70 m/s<sup>2</sup></b>	<b>-3,93 m/s<sup>2</sup></b>
<b>Temps à la décélération max</b>	<b>1,40 s</b>	<b>1,45 s</b>
<b>Distance Navette Target après le freinage</b>	<b>11,9 m</b>	<b>10,8 m</b>

#### 4.4. Conclusion

A ce stade de l'étude on s'est focalisé sur l'amélioration de la représentativité de la plateforme de simulation par rapport au contrôle longitudinal de la navette notamment sur des scénarios de freinage d'urgence. Les résultats de corrélation obtenus sont suffisamment corrects pour valider l'approche de la transcription du scénario simulable, la modélisation du système du freinage et la plateforme de simulation. Nous travaillons pour la suite sur la définition d'une méthodologie de simulation pour la validation de la sécurité de la navette autonome, et nous allons avoir certainement besoin de plus de données d'essais afin d'évaluer la pertinence la méthodologie.

## Annexes

Voir le document Annexe du Livrable 2.4-4 – Lecture restreinte Renault/IRT SystemX

## Références

- 1- Zwillinger, D. and Kokoska, S. (2000). CRC Standard Probability and Statistics Tables and Formulae. Chapman & Hall: New York. 2000. Section 14.7
- 2- M Maurice Frechet. Sur quelques points du calcul fonctionnel. Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo (1884-1940), 22(1):1-72, 1906.
- 3- Thomas Eiter and Heikki Mannila. Computing discrete Frechet distance. Technical report, 1994.
- 4- Anne Driemel, Sariel Har-Peled, and Carola Wenk. Approximating the Frechet Distance for Realistic Curves in Near Linear Time. Discrete & Computational Geometry, 48(1): 94-127, 2012. ISSN 1432-0444. doi: 10.1007/s00454-012-9402-z. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00454-012-9402-z>.
- 5- Helmut Alt and Michael Godau. Computing the Frechet Distance Between Two Polygonal Curves. International Journal of Computational Geometry & Applications, 05 (01n02):75-91, 1995. doi: 10.1142/S0218195995000064.
- 6- Donald J Berndt and James Clifford. Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series. In Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, AAAIWS'94, pages 359-370. AAAI Press, 1994. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3000850.3000887>.
- 7- François Petitjean, Alain Ketterlin, and Pierre Gançarski. A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering. Pattern Recognition, 44 (3):678-693, 2011. ISSN 0031-3203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.09.013>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003132031000453X>.
- 8- Stan Salvador and Philip Chan. Toward Accurate Dynamic Time Warping in Linear Time and Space. Intell. Data Anal., 11(5):561-580, oct 2007. ISSN 1088-467X. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1367985.1367993>.