

LIVRABLE **L2.4-2**

Méthodologie d'aide à la démonstration de la sécurité par la simulation numérique

Version : 1.0

Date de version : 22/06/2022

Numéro Chrono : ISX-SAM-LIV-1346



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 : 21/06/2022

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 la tâche 2.4
Hakim SOUKI	IRT SystemX	Contributeur à la tâche 2.4
Loutfi BELAARIBI	IRT SystemX	Contributeur à la tâche 2.4
Relecteurs	Organisation	
Vincent HONNET	IRT SystemX	Responsable du lot 2
Sana TMAR	IRT SystemX	Coordinatrice du lot 2

Table de révision :

Version	Date	Contenu de la modification
0.1		Draft
1.0	22/06/2022	Description de la méthodologie et cas d'usage VP

Table des matières

Informations du document	2
Table des matières	3
Table des illustrations et tableaux	4
Glossaire	5
Document de références	5
Résumé exécutif	6
Introduction	8
1. Objectif du livrable	9
2. Méthodologie de simulation numérique	10
2.1. Objectif	10
2.2. Méthode proposée.....	10
2.2.1. Sélection	10
2.2.2. Scénarisation	10
2.2.3. Simulation	11
2.2.4. Corrélacion	14
2.2.5. Validation	18
3. Application de la méthodologie à un cas concret	19
3.1. Système étudié	19
3.2. Sélection des cas d'usage.....	19
3.3. Scénarisation sur l'outil de simulation	25
3.4. Plateforme de simulation	26
3.5. Corrélacion	27
3.6. Validation	28
Conclusion	35
Références	36

Table des illustrations et tableaux

Figure 1 : Distance de Fréchet discrète.....	16
Figure 2 : Lock-step (Euclidean) alignment.....	17
Figure 3 : DTW alignment	17
Tableau 1 : Indicateurs de corrélation.....	18
Figure 4 : Décomposition de la réaction du véhicule lors d'un arrêt d'urgence	19
Figure 5 : Car-to-Car Rear stationary	20
Figure 6 : Car-to-Car Rear moving	20
Figure 7 : Car-to-Car Rear braking.....	20
Figure 8 : Car-to-Car Front turn-across-path.....	20
Figure 9 : Car-to-Pedestrian Nearside Adult 25 & 75.....	21
Figure 10 : Car-to-Pedestrian Farside Adult 50	21
Figure 11 : Car-to-Pedestrian Nearside Child.....	21
Figure 12 : Car-to-Pedestrian Longitudinal Adult	22
Figure 13 : Car-to-Pedestrian Turnin Adult	22
Figure 14 : Car-to-Pedestrian Reverse Adult from Nearside (right) and Stationary (left)	23
Figure 15 : Car-to-Bicyclist Nearside Adult.....	23
Figure 16 : Car-to-Bicyclist Nearside Adult Obstructed.....	24
Figure 17 : Car-to-Bicyclist Farside Adult	24
Figure 18 : Car-to-Bicyclist Longitudinal Adult.....	25
Figure 19 : Comparaison de la distance d'arrêt de la voiture cible (scénario de freinage).....	26
Figure 20 : Schéma de la plateforme de simulation Renault	27
Figure 21 : Comparaison de la distance d'arrêt de la voiture cible (scénario de freinage).....	27
Figure 22 : Page principale du module UTAC Score	28
Tableau 2 : Barème des points des tests AEB piétons.....	29
Tableau 3 : CPFA (Daytime).....	29
Tableau 4 : CPNA-25.....	30
Tableau 5 : CPNA-75.....	30
Tableau 6 : CPNC-50.....	31
Tableau 7 : CPRA.....	31
Tableau 8 : CPTA-50	32
Tableau 9 : CPLA-50.....	32
Tableau 10 : CPLA-25.....	32
Tableau 11 : Résumé des essais AEB	33
Tableau 12 : Note globale des essais AEB	33
Équation 1 : Calcul du score NCAP	33
Figure 23 : Note EuroNCAP Mégane E-Tech 2022.....	34

Glossaire

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AEB	Autonomous Emergency Braking
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)
VP	Véhicule Privé
VRU	Vulnerable Road User
VUT	Vehicle Under Test

Document de références

Titre	Référence	Version	Date
ISX-SAM-LIV-1345.pdf – Architecture générique d'une plateforme de simulation outillée.pdf	[DR01]	0.3	2021
ISX-SAM-LIV-1241.pdf – POCs d'expérimentations : Méthodologie de simulation pour la validation du véhicule autonome	[DR02]	4.1	2021
https://cdn.euroncap.com/media/62794/euro-ncap-aeb-c2c-test-protocol-v303.pdf	[DR03]	3.0.3	2021
https://cdn.euroncap.com/media/62795/euro-ncap-aeb-vru-test-protocol-v304.pdf	[DR04]	3.0.4	2021

Résumé exécutif

Contexte du projet SAM (Sécurité et l'Acceptabilité de la conduite et de la Mobilité autonome):

Afin de soutenir des projets d'Expérimentation du Véhicule Routier Autonome (EVRA), l'ADEME a lancé l'Appel à Projets EVRA dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir (PIA), dont l'objectif est de concourir aux développements de méthodologies de validation de la sécurité, à l'amélioration des connaissances sur les usages, l'acceptabilité et les impacts sociétaux.

En réponse à cet appel à projets et en cohérence avec le programme national FVA, un consortium d'acteurs industriels (constructeurs, opérateurs de transport, systémiers et équipementiers, gestionnaires d'infrastructures), d'acteurs de la recherche et de partenaires territoriaux se rassemble pour réaliser un projet d'envergure sur la Sécurité et l'Acceptabilité de la conduite et de la Mobilité autonome (SAM), d'un budget consolidé de 114 M€.

Ce projet 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.

Sous le pilotage de la PFA, le projet SAM associe 11 industriels (Alstom, Vinci-Cofiroute, EasyMile, Keolis, PSA, RATP, Renault, SNCF, Transdev, TwinswHeel, Valeo) pour réaliser des expérimentations et 8 partenaires pour en assurer la méthodologie et les évaluations dans leur domaine d'excellence (Cerema, IFP Energies Nouvelles, IGN, Le LAB, ENPC/LVMT, SystemX, UTAC CERAM, VEDECOM).

Le « bien commun » sera construit à partir d'expérimentations de véhicules autonomes sur routes ouvertes. Plus de 500 000 utilisateurs ou usagers testeront une centaine de véhicules autonomes sur 13 territoires d'expérimentation sélectionnés en France, sur une durée de 6 à 30 mois.

A propos du livrable

Ce livrable s'inscrit dans le cadre de la tâche 2.4 et a pour objectif de présenter la méthodologie de simulation numérique 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 scénarios pour contribuer à la démonstration de la sécurité pour ensuite tester cette méthodologie.

La méthodologie proposée comporte cinq 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 ;
5. Validation du système étudié.

L'étape de sélection des cas d'usage se base sur les cas sélectionnés par les partenaires et les cas remarquables 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 et à les intégrer à la troisième étape sur la plateforme de simulation. L'avant-dernière étape est consacrée à la comparaison des essais réels

et de la simulation à l'aide de méthodes spécifiques (Ref.2.2.4 Corrélation). Finalement, l'ultime étape est dédiée à la validation du système vis-à-vis des critères définis par la réglementation et la sécurité.

Introduction

Les véhicules autonomes permettront dans les prochaines années de déléguer la conduite, néanmoins leur développement est complexe et la validation de ces derniers est longue et fastidieuse. Pour faciliter leur intégration, il est nécessaire d'expérimenter massivement afin de 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 réglementation, 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.

Les objectifs de sécurité nécessaires à atteindre par de telles technologies sont souvent difficilement atteignables par des tests et essais physiques. Par exemple, il est estimé qu'un très grand nombre de kilomètres de tests de roulages sont nécessaires pour valider une telle technologie, pouvant prendre ainsi des années et nécessiter un très coût très important.

La simulation paraît être un moyen complémentaire permettant de vérifier le comportement des véhicules autonomes au niveau modèle. Pour utiliser la simulation numérique à bon escient, il est donc nécessaire de définir une méthodologie rigoureuse prenant en compte l'environnement de l'utilisateur, les modèles étudiés et les données à analyser.

Cette méthodologie, développée en étapes successives mais aussi itératives, doit fournir à l'utilisateur les clés pour établir les outils nécessaires à la validation des modèles par la simulation. Elle commence par la sélection de scénarios et l'usage d'un scénario manager, pour ensuite simuler ces scénarios à l'aide d'une plateforme de simulation décrite en partie dans ce document mais détaillée dans le document [DR01].

Des outils de corrélation présentés dans le document [DR02] sont fournis dans la méthodologie pour valider la plateforme de simulation et ainsi passer à l'étape de validation du système à l'aide de la simulation.

1. Objectif du livrable

L'objectif de ce document est de présenter la méthodologie de simulation numérique à base de scénarios mise en place dans le contexte du projet SAM. Cette méthodologie est utilisée dans la validation des systèmes de chauffeurs autonomes et/ou ADAS.

La méthodologie sera décrite dans une première partie en présentant les points suivants :

- Les objectifs de cette dernière dans le contexte de l'utilisation de la simulation numérique au cours de la validation des systèmes ADAS ;
- Les étapes successives de son déroulement :
 - La sélection des cas d'usage ;
 - La scénarisation de ces cas en scénarios simulables sur la plateforme de simulation ;
 - La conception de la plateforme de simulation et l'exécution des scénarios sur celle-ci ;
 - La corrélation entre les essais physiques réalisés en amont et des simulations pour déterminer le domaine de validité de la plateforme ;
 - La validation du système grâce aux critères de performances prédéfinis des systèmes étudiés.

Une dernière partie sera dédiée à l'application de la méthodologie sur un cas concret étudié avec nos partenaires sur le projet SAM.

2. Méthodologie de simulation numérique

2.1. Objectif

Ce chapitre est dédié à la présentation de l'ensemble du processus de simulation numérique conçu dans le cadre de la tâche 2.4 du projet SAM. L'objectif est de fournir une preuve de concept à la méthodologie de simulation numérique proposée, ainsi que les outils utilisés à travers un exemple grâce à une expérimentation réalisée avec un partenaire.

Ce processus pourra ensuite être diffusé chez nos partenaires pour la validation sécuritaire de leurs modèles de véhicules et/ou AD/ADAS.

Pour rappel, la tâche 2.4 a pour vocation de définir et outiller une méthodologie de simulation numérique à base de scénarios pour la validation des aspects sécuritaires du véhicule autonome. Le bon déroulement de cette méthodologie reste évidemment dépendant des données disponibles en entrée, c'est-à-dire les scénarios de test, les modèles représentatifs ainsi que les essais physiques permettant une comparaison de la plateforme avec le modèle existant.

Dans le prochain chapitre nous allons présenter la méthodologie et ses étapes dans l'ordre logique tel un protocole scientifique.

2.2. Méthode proposée

Cette partie présente la structure globale de la méthodologie de simulation mise en place dans le cadre du projet SAM. Cette méthodologie propose un processus de validation par la simulation à partir de la base des scénarios¹ mis en commun dans le cadre de la tâche 2.3. 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.

2.2.1. Sélection

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.

2.2.2. Scénarisation

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 tirées du livrable 2.1-5 Glossaire Safety :

- Scénario fonctionnel

¹ 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 (XP.8).

« 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 scénarios concrets 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.

2.2.3. Simulation

La méthodologie proposée est axée sur la simulation numérique, cela signifie que les scénarios créés seront exécutés sur une « Plateforme de simulation » conçue pour reproduire l'environnement réel dans lequel le système sous test devrait être testé.

- **Description générale**

Cette plateforme de simulation peut prendre plusieurs formes en fonction des outils utilisés. Ces derniers sont définis dans la liste suivante :

- MIL : Model-in-the-loop

- La logique du contrôleur est simulée en boucle fermée, et ce avec des modèles de dynamique du véhicule, de capteurs, d'actionneurs et de trafic environnant. La configuration du système de contrôle et les paramètres de la loi de contrôle sont adaptés pour répondre aux exigences de stabilité et de performances souhaitées.

- SIL : Software-in-the-loop

- Dès lors que les résultats obtenus à partir des simulations MIL sont jugés suffisants, le code logiciel peut être généré à partir du modèle du système de contrôle en utilisant la génération automatique de code.

- HIL : Hardware-in-the-loop

- Le matériel réel peut être testé dans une simulation Hardware-in-the-loop en temps réel. Les simulations HIL consistent en une combinaison de composants simulés et physiques.

- VIL : Vehicle-in-the-loop

- Un essai VIL consiste à modifier un véhicule à tester équipé d'un système d'aide à la conduite en reliant les sorties des capteurs à un ordinateur embarqué qui modélise l'environnement. Une scène incorporant des éléments virtuels (obstacle, véhicule, etc.) est simulée en temps réel pendant toute la durée de l'essai.

- **Plateforme de simulation**

La plateforme fait l'objet d'un livrable de la tâche 2.4 [DR01] qui décrit celle-ci sous plusieurs formes :

- Générique
- Spécifique

Les architectures décrites dans la partie précédente imposent des structures particulières en fonction des outils devant être intégrés dans la plateforme (Hardware/Software). Une plateforme de simulation est représentée par un schéma fonctionnel où trois parties distinctes sont définies :

- Bibliothèque de scénarios (Scenario Manager)
- Outils de simulation
- Post-traitement

Chaque bloc symbolise une étape du processus de simulation que nous allons définir dans les sous-parties suivantes.

- **Scenario Manager**

Tout d'abord le premier bloc représente les entrées à fournir à la plateforme de simulation, ce sont les futurs scénarios de simulation. Dans ce premier bloc on distingue plusieurs tâches qui permettront de définir des cas tests qui seront les descriptions des futurs scénarios de simulation. On nommera ce bloc *Scenario Manager*.

Dans le cas du projet SAM le module Scenario Manager est tiré de la plateforme MOSAR (Méthodes et Outils pour l'évaluation de la Sécurité de fonctionnement et l'Analyse de la Robustesse des véhicules autonomes), fruit de la collaboration des acteurs automobiles français de premier rang. Cette plateforme propose une méthodologie et une suite outillée pour concevoir et valider la sécurité du véhicule autonome avec notamment l'utilisation d'une base de scénarios.

La plateforme MOSAR définit un modèle de données et un format de fichier dérivé pour la description de scénarios qui pourraient être extraits pour être utilisés dans les simulateurs de conduite et de trafic, ainsi que dans le développement, les tests et la validation virtuels automobiles. La description d'un scénario peut être basée sur des actions du conducteur (par exemple, effectuer un changement de voie) ou sur des trajectoires (par exemple, dérivées d'une manœuvre de conduite enregistrée). Nous fournissons, dans ce qui suit une définition des éléments hiérarchiques, à partir desquels les scénarios sont construits, et leurs attributs et relations correspondants :

- Le storyboard, composé d'histoires, d'actes et de séquences ;
- Événements, déclenchés par des conditions, qui provoquent l'exécution d'actions ;
- Références aux descriptions logiques du réseau routier ;
- Les entités, telles que les véhicules, les piétons, agissant sur et hors de la route ;
- Paramétrage ;

D'autres contenus, tels que la description du véhicule ego, des piétons, des conditions de circulation et de l'environnement, sont également inclus.

Les descriptions de scénarios sont une partie essentielle pour tester, valider et certifier la sécurité des systèmes d'aide à la conduite et des voitures autonomes. L'industrie, les agences de certification et les autorités gouvernementales travaillent conjointement sur la définition de bibliothèques de scénarios, qui peuvent être utilisées pour tester et valider le fonctionnement sûr de tels systèmes.

Prenons l'exemple d'un système ADAS bien connu, l'*Autonomous Emergency Braking* (AEB). Nous avons ici un modèle qui contrôle la partie longitudinale du mouvement du véhicule, on vient ensuite dans la bibliothèque sélectionner les scénarios fonctionnels associés à ce type de manœuvre du véhicule, mais aussi au type d'environnement que l'on souhaite (véhicule seul, trafic environnant, piétons). On obtient ainsi un lot de scénarios logiques associés à un modèle que l'on souhaite tester c'est ce qu'on nomme des cas d'usage. Les cas d'usage représentant les sorties du *Scenario Manager* sont ensuite détaillés en un panel de scénarios concrets appelés cas tests exécutés par la suite via le système de simulation. Les cas tests sont obtenus à partir des scénarios logiques en fixant les paramètres relatifs aux environnements, aux autres véhicules, par exemple : les vitesses, les distances entre véhicules. Les combinaisons possibles entre l'ensemble des paramètres peuvent conduire à un nombre très élevé de scénario à simuler.

○ **Système de simulation**

Le second bloc est composé principalement des éléments alloués à l'exécution des scénarios de simulation tels que l'outil de simulation numérique, les modèles composant le véhicule (dynamique/ADAS/capteurs) et les cas tests issus du premier bloc. L'outil de simulation numérique peut prendre plusieurs formes, une multitude de logiciels peuvent prétendre à cette fonction.

En fonction des résultats que l'utilisateur souhaite mettre en avant lors des simulations, un être humain peut faire partie de la chaîne de simulation. Il est donc possible d'intégrer un simulateur physique en plus de l'outil de simulation numérique. La pluralité des simulateurs existants et donc des composants mécaniques vient appuyer la nécessité de sélectionner un outil de simulation ayant la capacité de s'interfacer avec eux.

En effet chaque outil étant différent, les formats et interfaces associés changent. Il est donc conseillé de construire une plateforme utilisant les outils déjà à disposition pour faciliter la mise en place et l'interfaçage des outils. Néanmoins, comme proposé dans le document [DR01], une plateforme dite « générique » est étudiée pour permettre, à l'avenir, d'homogénéiser les plateformes de simulation et faciliter le partage des données et modèles.

○ **Post-traitement**

Enfin, pour compléter la plateforme, il faut associer aux deux premiers blocs, une étape de post-traitement et de validation. L'objectif est d'extraire de la simulation les données pertinentes pour les confronter à des tests d'évaluation et/ou à des critères de performances définis dans la méthodologie. Cette étape permet de caractériser les simulations avec deux objectifs à la clé :

- L'amélioration continue de la plateforme
- La validation du système testé

Le premier objectif comprend la partie corrélation avec les essais physiques associés aux cas tests. A l'aide de méthodes de corrélation et d'indicateurs spécifiques, la simulation est caractérisée pour définir si la plateforme de simulation est bien valide pour tester le modèle sous test (chauffeur, ADAS, modèle dynamique). Comme dans un système en boucle fermée, dans le cas où le système testé ne présente pas de résultats cohérents lors de la simulation, il est donc nécessaire de modifier le deuxième bloc de la plateforme et donc d'améliorer le modèle mis en cause. Dès lors que les simulations sont considérées comme satisfaisantes, celles-ci sont comparées aux critères de validités et de performances du système de manière similaire à des essais réels. Cette dernière étape sera utilisée pour conclure sur la validité d'un système vis-à-vis des normes et de la réglementation en vigueur sur les systèmes du véhicule autonome.

2.2.4. 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 similarités et dissimilarités entre séries temporelles. Ces dernières seront présentées et formulées dans les deux sections qui suivent.

- **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 correspondant 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 :

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

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

- Critère d'amplitude des pics (A)

Ce critère est utilisé pour comparer les amplitudes des pics extrêmes maximum et minimum 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} le $f(T_{f_{extr}})$ et g_{extr} 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 δ une très petite valeur par rapport à 1, $f(t_n)$ le nième point de la courbe f et $g(t_n)$ 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 :

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

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

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

L'avantage de la méthode IAPE 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.

- **Métriques complémentaires proposées par SystemX**

- Distance de Fréchet discrète (1) :

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.

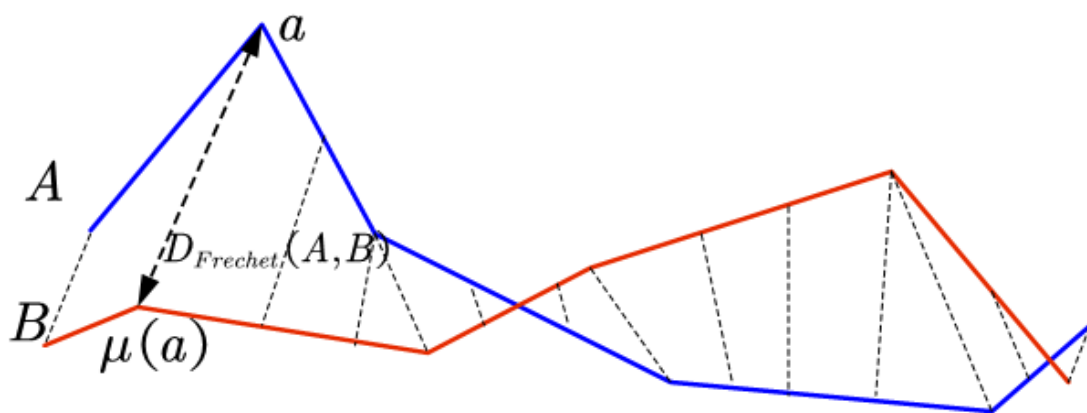


Figure 1 : Distance de Fréchet discrète

- Dynamic Time Warping (DTW) (2) :

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.

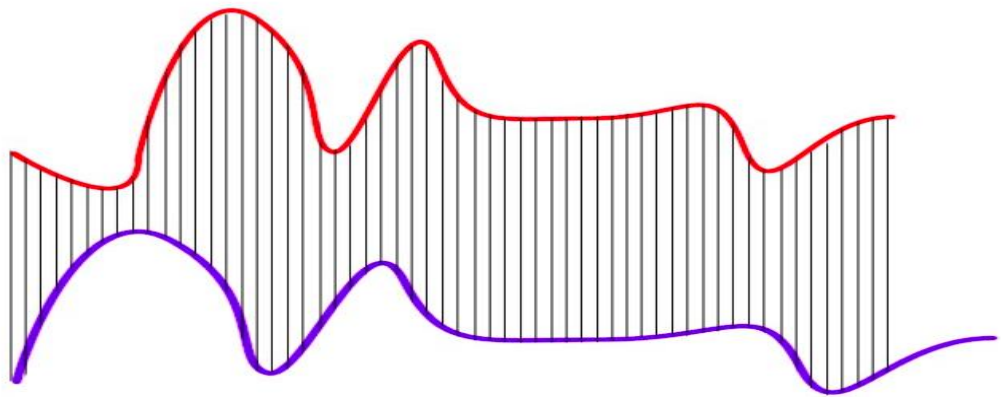


Figure 2 : Lock-step (Euclidean) alignment

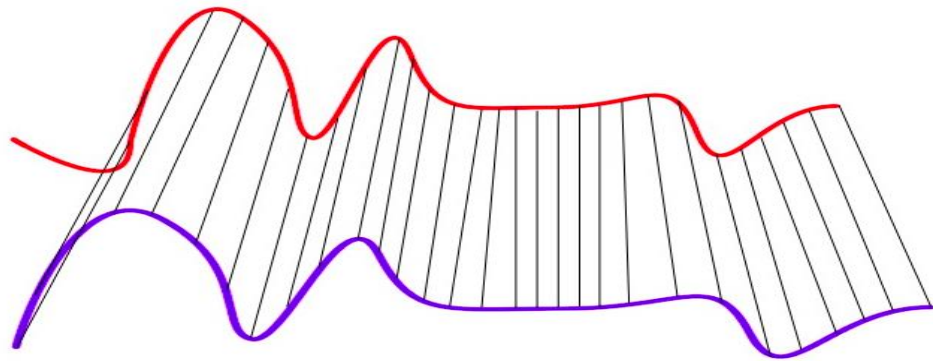


Figure 3 : DTW alignment

- 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 $cov(r_f, r_g)$ la covariance entre les rangs r_f et r_g et σ_{r_f} , σ_{r_g} 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	2.2.4.1/14
A	Critère d'amplitude des pics	2.2.4.1/14
P	Critère de profil de la courbe	2.2.4.1/15
E	Critère d'erreur	2.2.4.1/15
Discreet Fréchet distance	Distance de Fréchet discrète	2.2.4.2/16
DTW	Dynamic Time Warping	2.2.4.2/16
Frequency_components_comparison_error	Critère d'erreur sur le spectre fréquentiel	2.2.4.2/17
Spearman correlation	Corrélation croisée de Spearman	2.2.4.2/17

Tableau 1 : Indicateurs de corrélation

2.2.5. Validation

La validation du système représente la dernière étape du processus. En effet, une fois que les simulations ont été corrélées avec les essais physiques alors seulement la validation du système peut être effectuée.

Pour déterminer l'efficacité d'un système, il faut définir des critères de performances et/ou de sécurités données en général par la réglementation associée ou par les métiers en charge de la réception de ces systèmes. Evidemment, un système de chauffeur autonome de niveau 3 ne doit pas présenter les mêmes exigences de sécurités qu'un ADAS simple, de même qu'un système AEB n'a pas les mêmes exigences de sécurités qu'un système LSS. Ainsi, il faut vérifier la validité du système en fonction de critères définis pour chaque système.

Pour la suite du projet SAM les critères utilisés pour la validation du véhicule seront basés sur les travaux des tâches 2.1, 2.2 et 2.5. Nous présenterons dans l'exemple de la troisième partie des critères de sécurités basés sur la réglementation ALKS.

3. Application de la méthodologie à un cas concret

Pour présenter la méthodologie nous avons choisis en exemple un système testé avec notre partenaire *Renault*. Avant de décrire les différentes étapes de la méthodologie, nous allons introduire le système étudié auquel nous avons appliqué la méthodologie.

3.1. Système étudié

Nous avons, dans le cadre du projet, étudié plusieurs systèmes allant du simple système ADAS à une navette autonome de niveau 4. Pour développer l'ensemble des étapes de la méthodologie, nous avons choisi le système AEB, ce système est particulièrement présent dans le monde de l'automobile actuel et tend à se standardiser sur l'ensemble des nouveaux véhicules. En effet, à l'horizon 2023 99% des nouveaux véhicules vendus sur le marché américain devront posséder un système AEB, de même pour l'Europe qui a voté le déploiement du système sur l'ensemble des nouveaux véhicules à partir de juillet 2022.

Ce système est un freinage automatique d'urgence ou freinage autonome d'urgence (sigle AEB en anglais). C'est un dispositif qui permet à la voiture ou au camion de freiner automatiquement lorsqu'il détecte une collision imminente avec un véhicule, un piéton ou un autre obstacle détecté. L'arrêt d'urgence se décompose en deux étapes comme le montre la Figure 4 :

- la phase d'alerte du conducteur à l'aide d'un système FCW
- l'activation de l'AEB si le véhicule se trouve en deçà de la distance limite paramétrée.

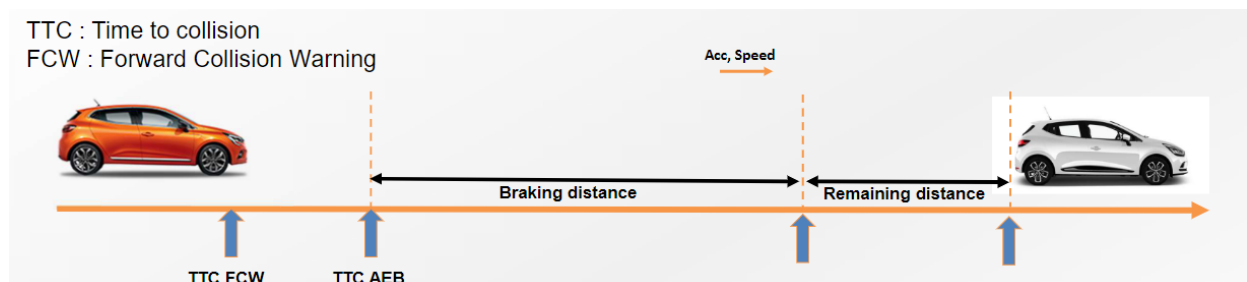


Figure 4 : Décomposition de la réaction du véhicule lors d'un arrêt d'urgence

Une fois le système sélectionné vient l'étape de sélection des cas d'usage. Nous précisons le déroulement dans l'étape suivante.

3.2. Sélection des cas d'usage

La sélection des cas d'usage se fait en partie à partir du choix du système étudié. Dans le cadre de l'étude le choix du système AEB nous permet de définir un panel de scénarios représentant une grande partie des cas dans lequel le système doit s'activer.

Afin de coller au plus près à la réglementation sur les essais AEB, nous avons sélectionné les cas sur la base des scénarios EuroNCAP en vigueur. Ceux-ci regroupent l'ensemble des essais effectués sur un système AEB pour la notation EuroNCAP, les cas d'usage sont définis dans le paragraphe suivant.

Les performances de la fonction AEB sont évaluées à l'aide de différents scénarios applicables aux systèmes :

- Arrêt sur véhicule : Car-to-Car scenarios

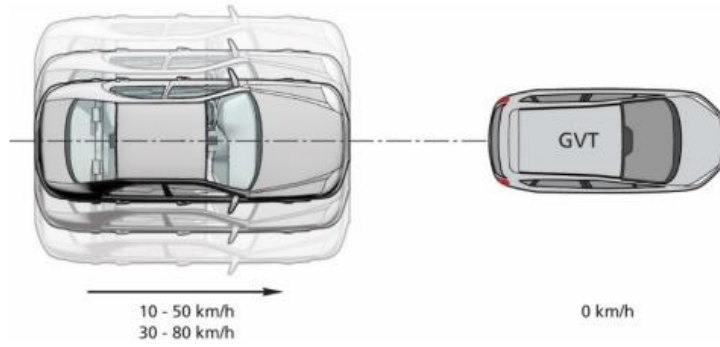


Figure 5 : Car-to-Car Rear stationary

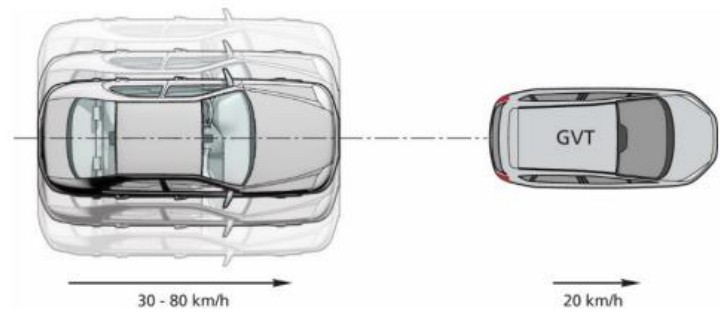


Figure 6 : Car-to-Car Rear moving

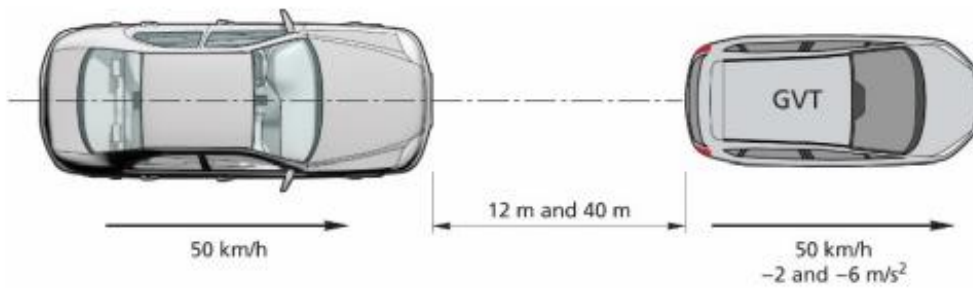


Figure 7 : Car-to-Car Rear braking

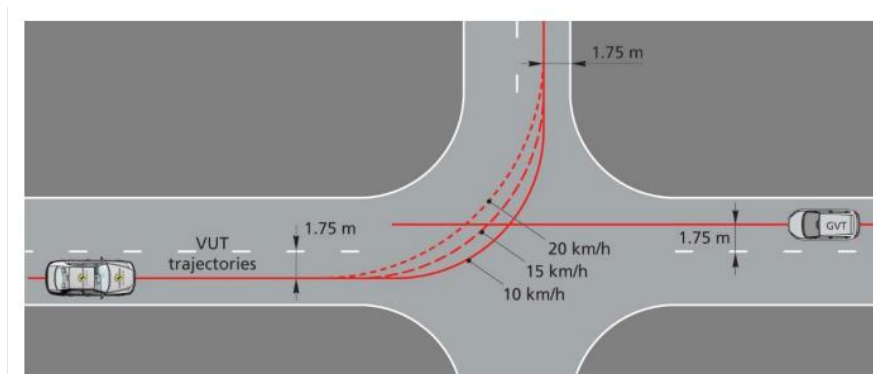


Figure 8 : Car-to-Car Front turn-across-path

- Arrêt sur piéton : Car-to-Pedestrian

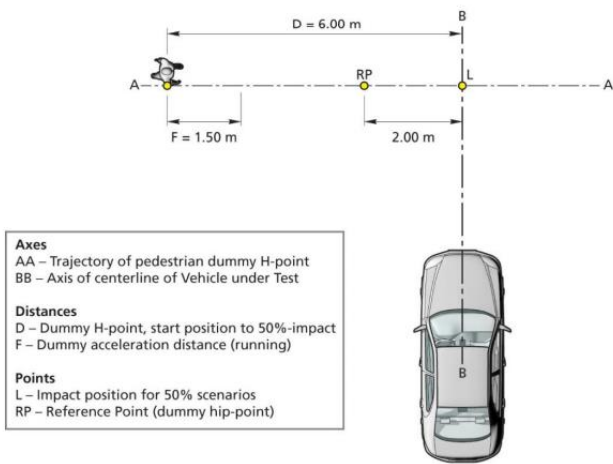


Figure 10 : Car-to-Pedestrian Farside Adult 50

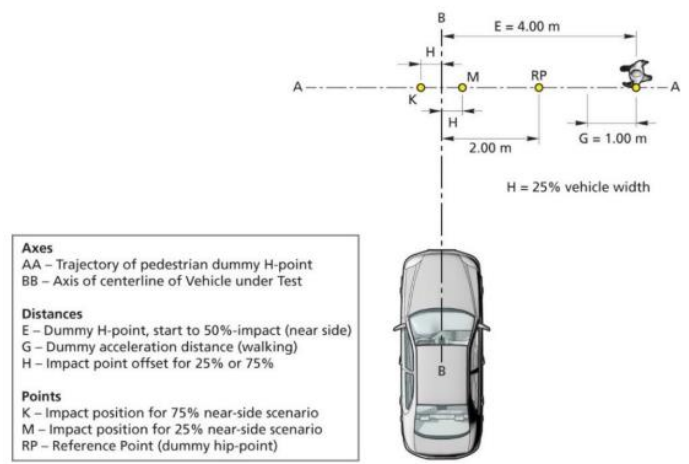


Figure 9 : Car-to-Pedestrian Nearside Adult 25 & 75

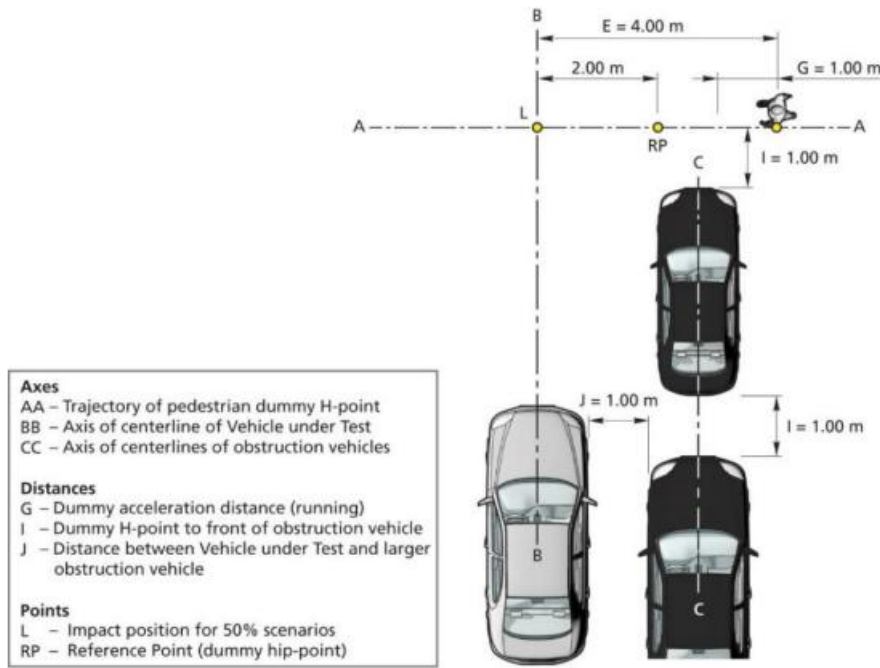


Figure 11 : Car-to-Pedestrian Nearside Child

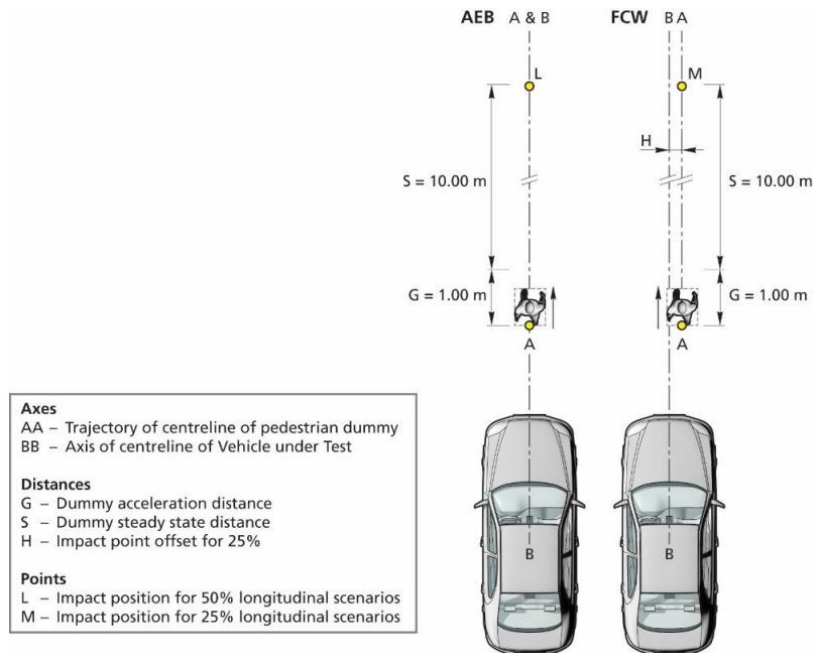


Figure 12 : Car-to-Pedestrian Longitudinal Adult

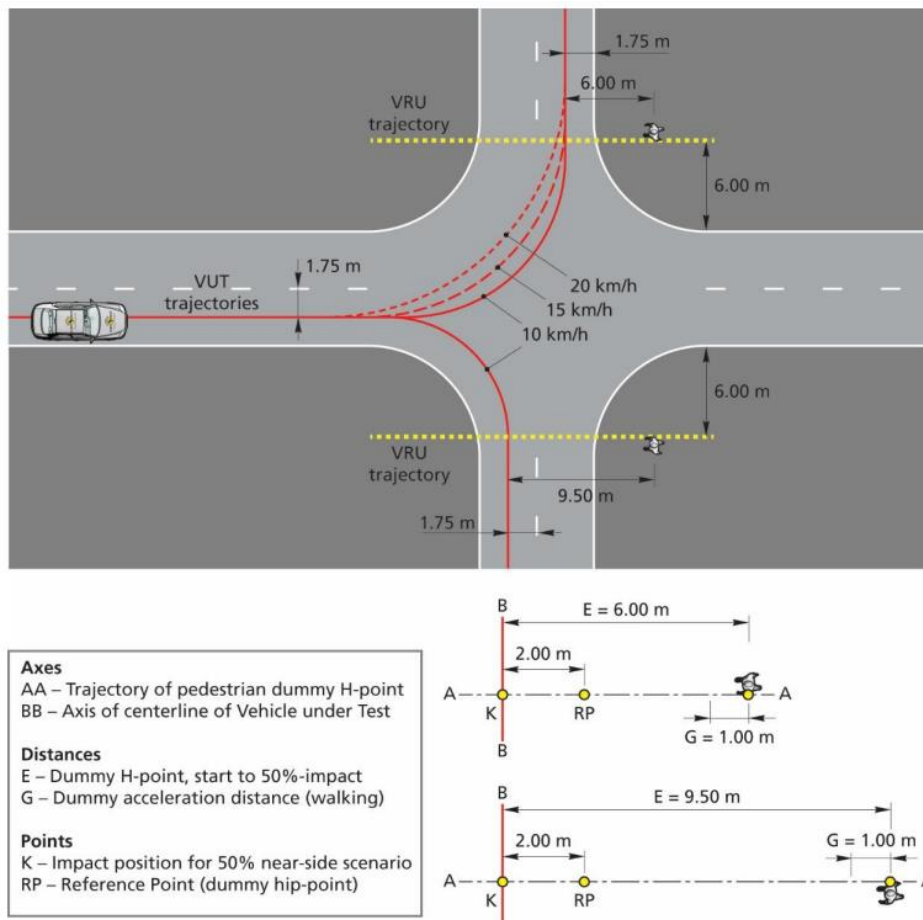


Figure 13 : Car-to-Pedestrian Turnin Adult

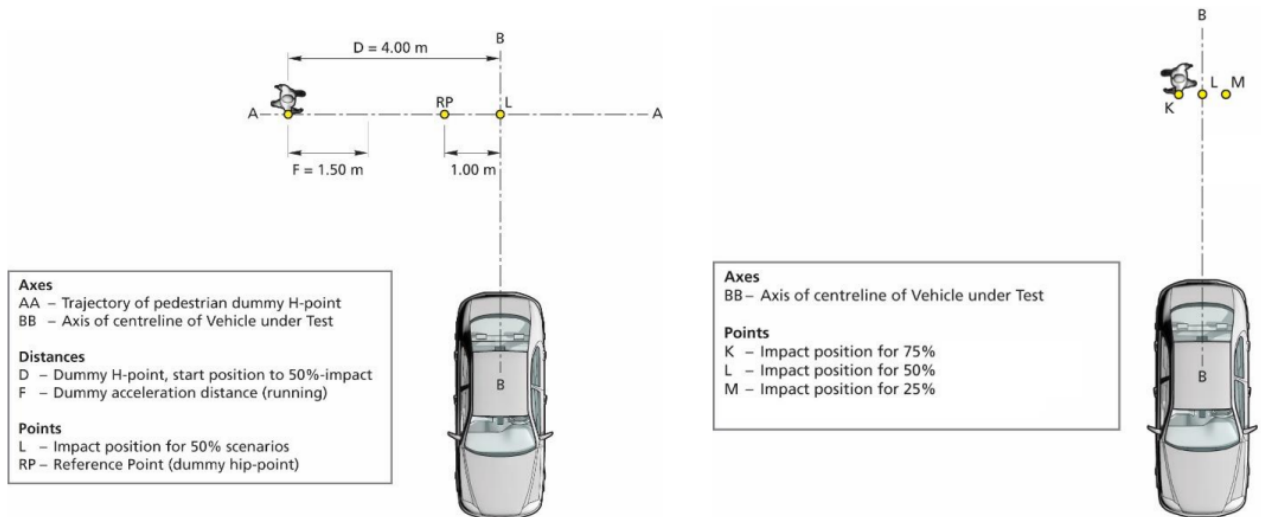


Figure 14 : Car-to-Pedestrian Reverse Adult from Nearside (right) and Stationary (left)

- Arrêt sur cycliste : Car-to-Bicycle

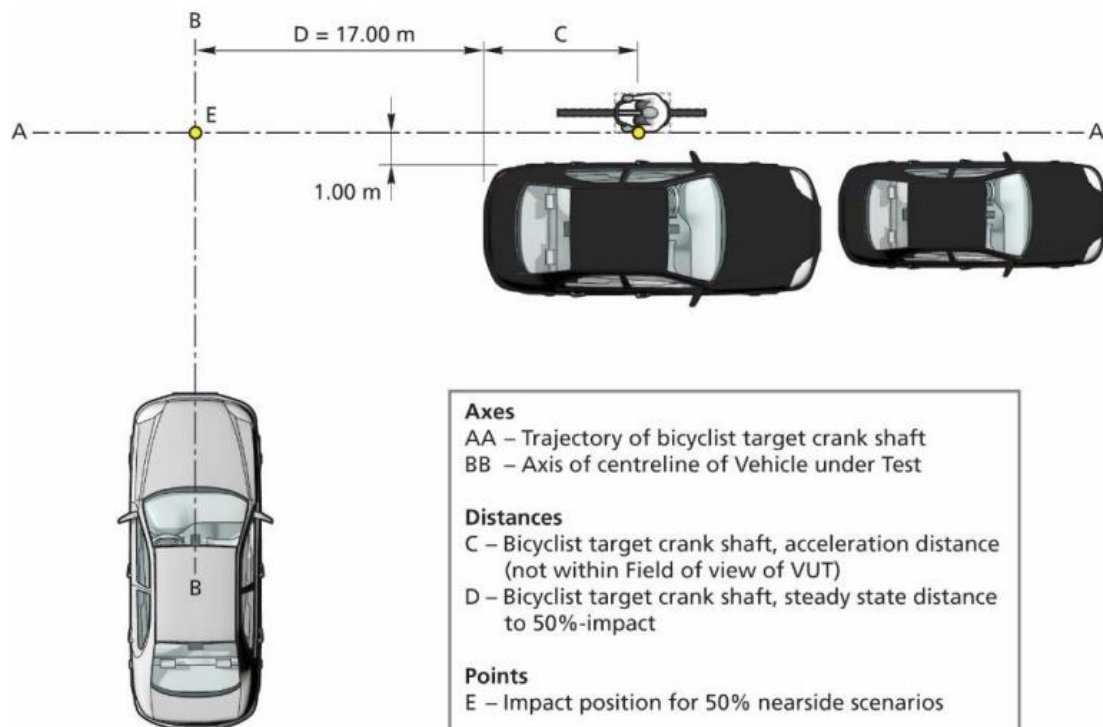


Figure 15 : Car-to-Bicyclist Nearside Adult

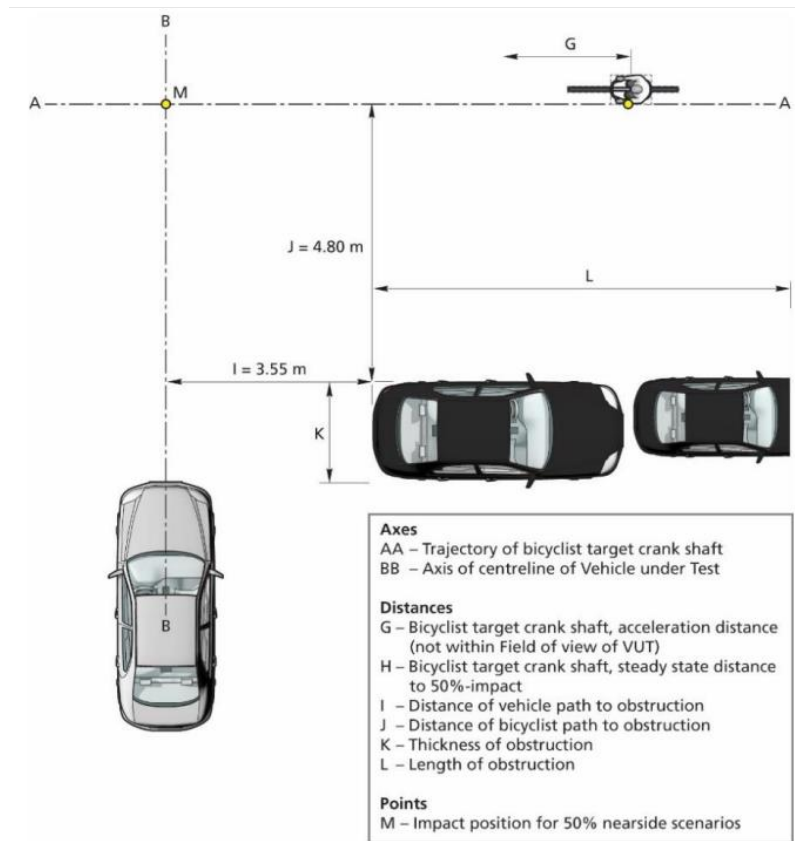


Figure 16: Car-to-Bicyclist Nearside Adult Obstructed

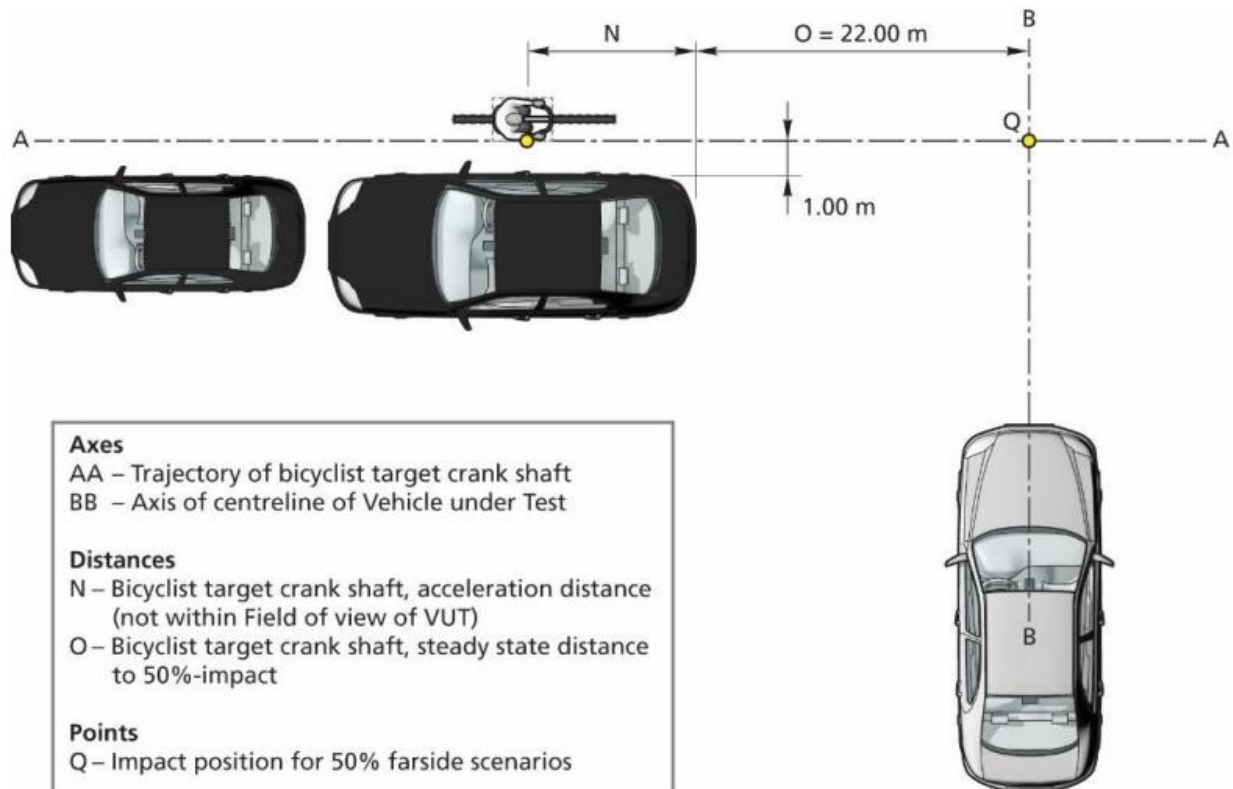


Figure 17: Car-to-Bicyclist Farside Adult

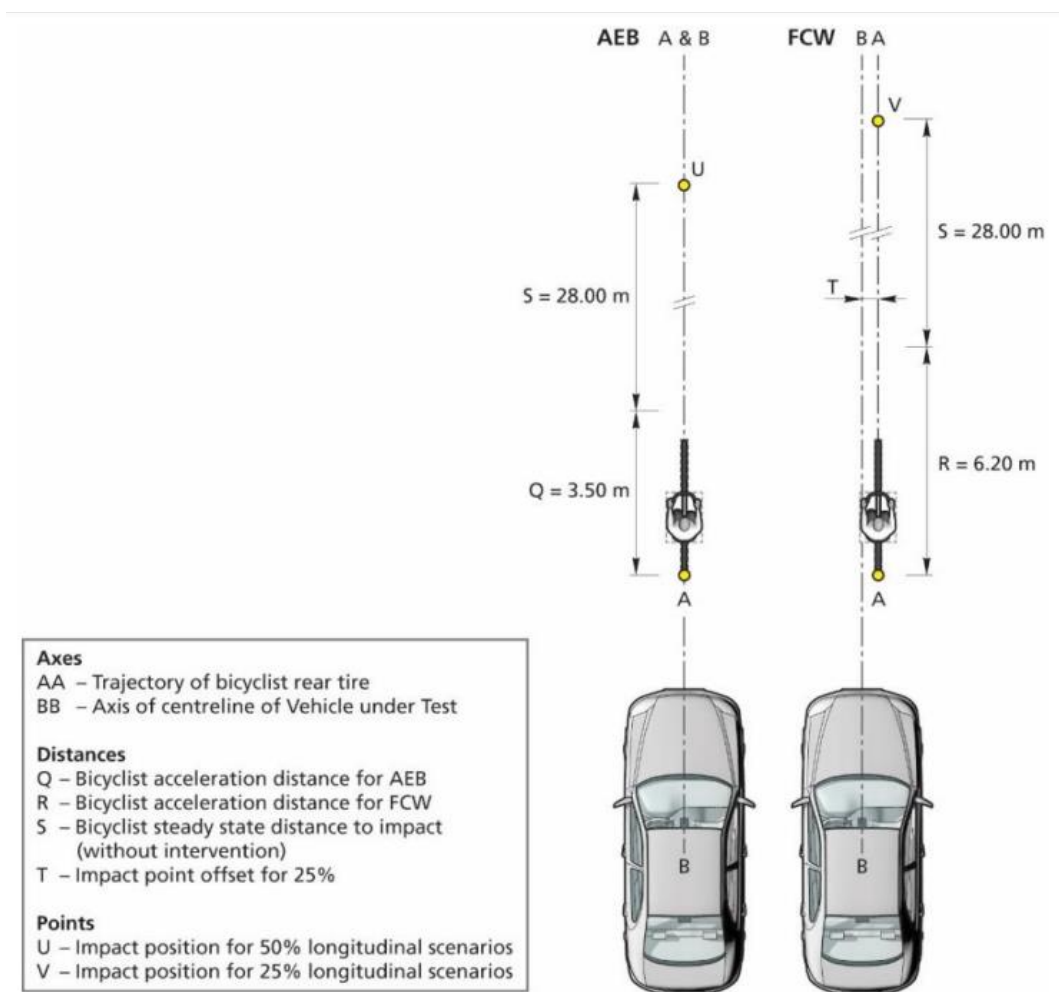


Figure 18 : Car-to-Bicyclist Longitudinal Adult

Les tests pour ces scénarios sont définis dans les protocoles NCAP disponibles sur le site internet de l'EuroNCAP. Ces protocoles sont décrits dans les documents [DR03] et [DR04], ils permettent la mise en œuvre des essais réels sur piste mais aussi la description des scénarios pour l'étape de scénarisation.

3.3. Scénarisation sur l'outil de simulation

La scénarisation est une étape cruciale dans le processus. En effet, les scénarios qui seront simulés doivent correspondre au plus près au cas test réel pour que les résultats de simulation puissent être comparés aux essais physiques.

L'utilisation de cas test EuroNCAP permet de se baser sur les protocoles définis par l'organisme de sécurité qui décrivent explicitement la logique, les trajectoires et les variables à prendre en compte. Pour accélérer le déroulement du projet nous avons fait le choix au sein de l'équipe d'utiliser les scénarios développés par l'UTAC sur l'outil de simulation SCANeRstudio. En effet, cet outil étant privilégié au sein du projet SAM, nous avons profité du savoir-faire de l'UTAC pour directement utiliser les scénarios qu'ils ont conçus.

Les scénarios de l'UTAC sont conçus à partir de données réelles enregistrées par les installations d'essai de l'UTAC. Chaque essai ADAS est réalisé conformément au protocole d'essai. Le terrain d'essai ainsi que l'ensemble des données de trajectoires étant réutilisés pour la scénarisation, l'UTAC est

capable de certifier une reproduction de l'essai via l'outil de simulation presque identique (cf illustration 19).

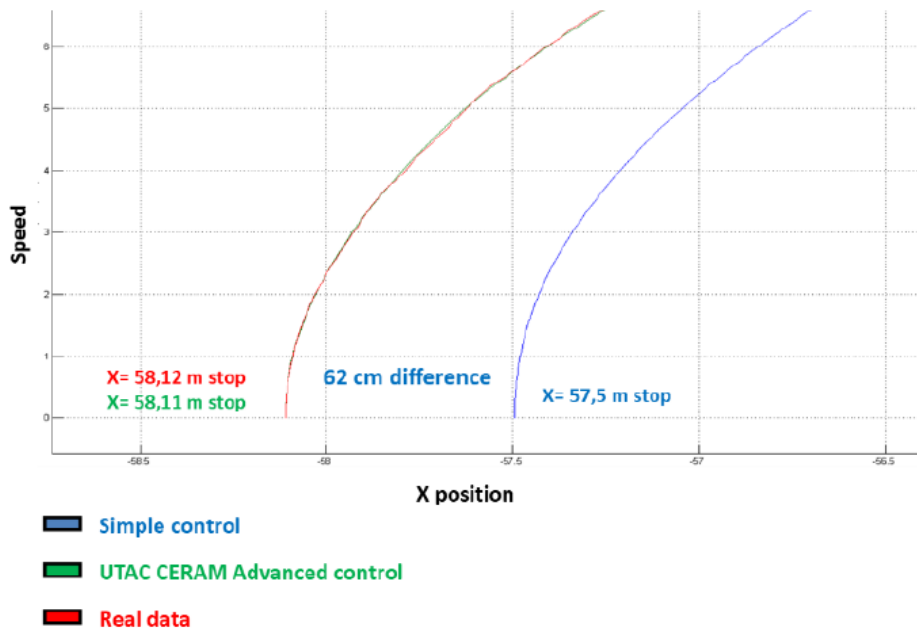


Figure 19 : Comparaison de la distance d'arrêt de la voiture cible (scénario de freinage)

À partir des données enregistrées sur le terrain de l'UTAC - **TEQMO**, l'ensemble des scénarios décrits dans la partie précédente sont disponibles à la simulation avec en paramètres d'entrées les variables usuelles telles que la vitesse du véhicule EGO, le calage du point d'impact, etc.

3.4. Plateforme de simulation

La plateforme utilisée dans le cadre des simulations menées avec Renault rejoint l'architecture décrite dans le livrable 2.4-3 [DR01]. Celle-ci suit le schéma de trois blocs distincts :

- Bibliothèque de scénario ;
- Outil de simulation et modèles ;
- Post-traitement.

Le premier bloc est ici défini par le catalogue de scénarios mis à disposition par le pack UTAC pour SCANeRstudio. Nous supposons qu'ils sont tirés de la plateforme MOSAR dans laquelle ces scénarios sont déjà décrits. Le choix du système étudié, ici l'AEB, nous amène à choisir des cas de tests spécifiques voir 3.2.

Le second bloc représente la plateforme d'exécution, celle-ci était déjà existante chez Renault, nous avons simplement sélectionné le système que l'on souhaitait étudier et l'avons interfacé avec cette dernière. Le fonctionnement global est schématisé dans la Figure 20. Dans cet exemple, l'outil de simulation SCANeRstudio intègre l'ensemble des acteurs et modèles du scénario. Toutefois, les modèles véhicules et les données capteurs doivent s'interfacé avec des modèles externes à SCANeRstudio :

- MADA : modèle véhicule utilisé par Renault
- MIL AEB : Loi de commande Renault pour l'arrêt d'urgence

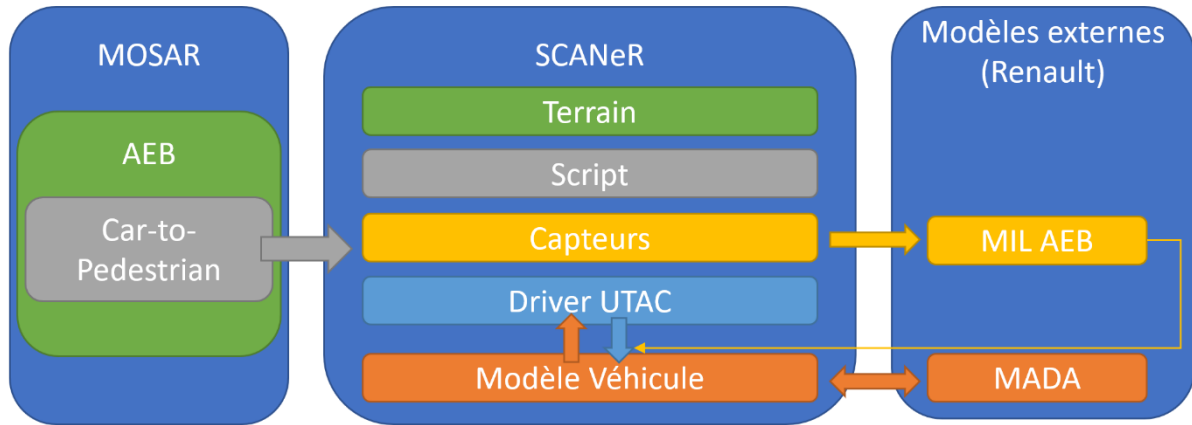


Figure 20 : Schéma de la plateforme de simulation Renault

La dernière partie de la plateforme est déroulée dans les parties suivantes vis-à-vis de l'analyse des données obtenues avec les simulations.

3.5. Corrélation

La corrélation menée sur le système AEB a été réalisée en amont du projet SAM par les équipes de Renault et de l'UTAC. La méthodologie IAPE décrite dans la partie 2 est issue de ces travaux sur l'AEB, ce qui a permis dans le déroulement de la méthodologie de valider le fonctionnement de la plateforme pour le cas du système AEB et de basculer rapidement sur la validation du système.

La figure ci-dessous montre un exemple de résultat de corrélation pour un essai AEB.

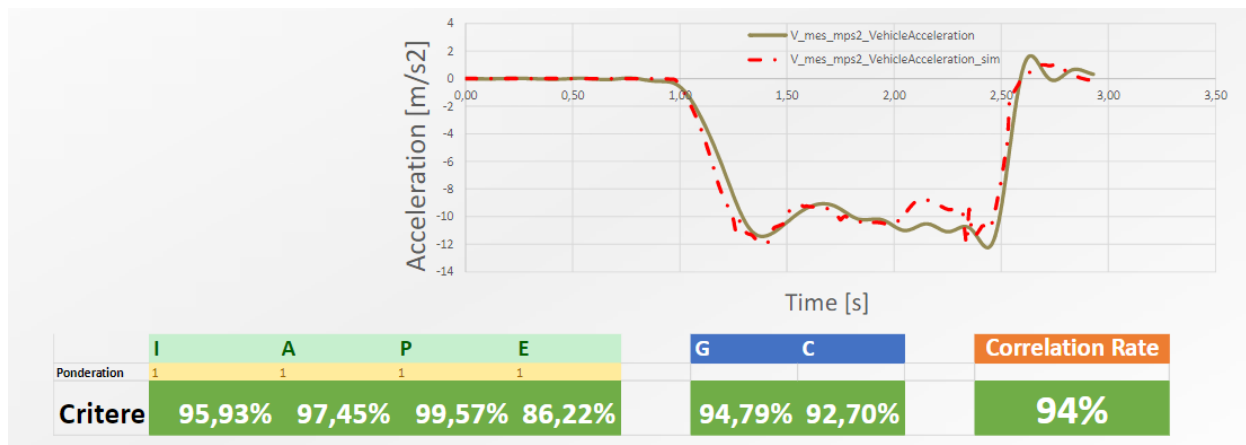


Figure 21 : Comparaison de la distance d'arrêt de la voiture cible (scénario de freinage)

La plateforme de simulation de Renault contenant le modèle AEB a donc été confirmée dans sa similitude avec les essais physiques. Par conséquent nous prenons comme référence ce domaine de fonctionnement pour la plateforme et passons à l'étape de validation du système. Un travail plus développé des méthodes de corrélation a été mené sur d'autres systèmes ADAS (LSS : LDW/ELK/LKA) et est présenté dans le livrable 2.4-4 [DR02].

3.6. Validation

Bien que la corrélation concernant la plateforme contenant le modèle AEB ait été validée, cela ne signifie pas que le modèle AEB est pour autant valide pour une industrialisation et l'intégration sur les véhicules réels.

La corrélation a permis de certifier que la plateforme est bien représentative des essais réels sur le domaine suivant : cas d'usage AEB. Il est maintenant nécessaire dans le processus de valider le système étudié, pour se faire une liste de critères est définie en fonction des scénarios. Ces critères doivent prendre en compte la sécurité du véhicule et de ses occupants ainsi que des autres usagers de la route. Ils sont donc dépendants de bon nombre d'autres critères définis par la réglementation mais aussi par les autres tâches du projet SAM.

Dans le cas du système AEB de Renault, nous avons effectué plusieurs comparaisons en commençant par la notation EuroNCAP². Cette notation introduite en 2009, donne une note de sécurité regroupant quatre domaines majeurs :

- Protection des occupants adultes ;
- Protection des jeunes passagers ;
- Protections des usagers vulnérables de la route ou VRU ;
- Aide à la sécurité (technologies d'aide à la conduite).

Nous développerons dans cette partie les résultats obtenus dans le domaine de la protection des usagers vulnérables. Les résultats des simulations et autres comparaisons apparaîtrons dans le livrable 2.4-4 du projet SAM.

Les outils mis à notre disposition via le pack UTAC EuroNCAP pour SCANerStudio nous ont permis de générer une notation EuroNCAP avec le véhicule utilisé en simulation à l'aide d'un module SCANer intégré appelé UTAC Score : Figure 22.

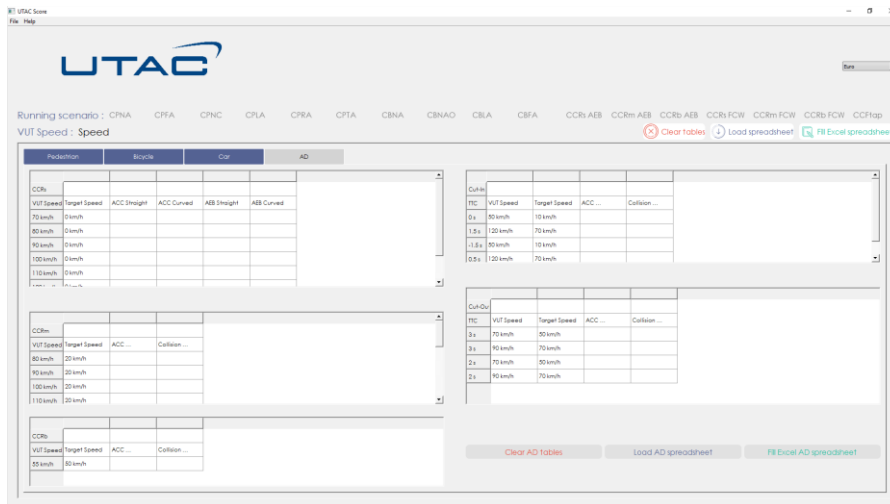


Figure 22 : Page principale du module UTAC Score

Cela a permis de remplir au fur et à mesure la feuille de notation du véhicule et de son système lors des simulations des cas d'usage présentés dans la partie 3.2. Pour chaque scénario logique, les cas concrets ont été simulés pour couvrir l'ensemble du tableau de notation. Nous présentons ci-après les résultats obtenus pour chaque cas de la partie VRU de l'EuroNCAP. Ceux-ci présentent les notes en fonction de l'issue du scénario, s'il y a collision ou non et la valeur de la vitesse d'impact dans le cas de la collision.

² Description de la notation sur le site de l'EuroNCAP

Cet ensemble permet de donner une note qui sera ensuite pondérée pour fournir une note globale entre tous les cas. Ce barème est présenté dans le Tableau 2 : Barème des points des tests AEB piétons **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Test speed	Daytime										Nighttime				
	CPFA	CPNA			CPNC	CPLA		CPTA		CPRA		CPNA		CPLA	
	50%	25%	75%	50%	50%	25%	Farside	Nearside	Stationary	Moving	25%	75%	50%	25%	
4 km/h										1.000	1.000				
8 km/h										1.000	1.000				
10 km/h	1.000	1.000	1.000	1.000				1.000	1.000			1.000	1.000		
15 km/h	1.000	1.000	1.000	1.000				1.000				1.000	1.000		
20 km/h	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000			1.000				1.000	1.000	1.000	
25 km/h	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000							1.000	1.000	1.000	
30 km/h	2.000	2.000	2.000	2.000	1.000							1.000	1.000	1.000	
35 km/h	3.000	3.000	3.000	3.000	2.000							2.000	2.000	2.000	
40 km/h	3.000	3.000	3.000	3.000	2.000							2.000	2.000	2.000	
45 km/h	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000							3.000	3.000	3.000	
50 km/h	2.000	2.000	2.000	2.000	3.000	3.000						3.000	3.000	3.000	3.000
55 km/h	2.000	2.000	2.000	2.000	3.000	3.000						3.000	3.000	3.000	3.000
60 km/h	1.000	1.000	1.000	1.000	2.000	2.000						2.000	2.000	2.000	2.000
65 km/h						1.000									1.000
70 km/h						1.000									1.000
75 km/h						1.000									1.000
80 km/h						1.000									1.000
TOTAL	20.000	20.000	20.000	20.000	30.000		4.000	2.000	2.000	20.000	20.000	30.000			
Scenario points	0.500	0.250	0.250	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		

Tableau 2 : Barème des points des tests AEB piétons

Les scénarios exécutés sur la plateforme Renault (cf. 3.4) nous ont permis d'obtenir les résultats suivants pour l'ensemble des scénarios donnés par la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** :

- **CPFA (Daytime)**

CPFA-50	Vitesse	V _{Impact} (km/h)	Note
	10 km/h	0,00	1,000
	15 km/h	0,00	1,000
	20 km/h	0,00	1,000
	25 km/h	0,00	1,000
	30 km/h	0,00	2,000
	35 km/h	0,00	3,000
	40 km/h	0,00	3,000
	45 km/h	0,00	3,000
	50 km/h	28,94	2,000
	55 km/h	31,37	2,000
	60 km/h	44,86	0,000
CPFA-50 RESULT		19,000	

Tableau 3 : CPFA (Daytime)

- **CPNA-25 (Daytime & Night-time)**

CPNA-25	Vitesse	Daytime		Night-time	
		V _{Impact} (km/h)	Note	V _{Impact} (km/h)	Note
	10 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	15 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	20 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	25 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	30 km/h	0,00	2,000	0,00	1,000
	35 km/h	0,00	3,000	0,00	2,000
	40 km/h	0,00	3,000	0,00	2,000
	45 km/h	0,00	3,000	0,00	3,000
	50 km/h	25,77	2,000	27,42	3,000
	55 km/h	28,10	2,000	30,01	3,000
	60 km/h	42,39	0,000	48,09	0,000
CPNA-25 RESULT		19,000		18,000	

Tableau 4 : CPNA-25

- **CPNA-75 (Daytime & Night-time)**

CPNA-75	Vitesse	Daytime		Night-time	
		V _{Impact} (km/h)	Note	V _{Impact} (km/h)	Note
	10 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	15 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	20 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	25 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	30 km/h	0,00	2,000	0,00	1,000
	35 km/h	0,00	3,000	0,00	2,000
	40 km/h	0,00	3,000	0,00	2,000
	45 km/h	0,00	3,000	0,00	3,000
	50 km/h	8,95	2,000	6,93	3,000
	55 km/h	11,31	2,000	18,95	3,000
	60 km/h	21,97	1,000	24,99	2,000
CPNA-75 RESULT		20,000		20,000	

Tableau 5 : CPNA-75

- CPNC-50

CPNC-50	Vitesse	V _{Impact} (km/h)	Note
	10 km/h	0,00	1,000
	15 km/h	0,00	1,000
	20 km/h	0,00	1,000
	25 km/h	0,00	1,000
	30 km/h	0,00	2,000
	35 km/h	0,00	3,000
	40 km/h	0,00	3,000
	45 km/h	0,00	3,000
	50 km/h	11,86	2,000
	55 km/h	26,93	2,000
	60 km/h	33,92	1,000
CPNC-50 RESULT		20,000	

Tableau 6 : CPNC-50

- CPRA

CPRA	Vitesse	V _{Impact} (km/h)	
		Stationary	Moving
	4 km/h reverse		
	hitpoint @ 25%	0,00	
	hitpoint @ 50%	0,00	0,00
	hitpoint @ 75%	0,00	
	8 km/h reverse		
	hitpoint @ 25%	0,00	
	hitpoint @ 50%	0,00	0,00
	hitpoint @ 75%	0,00	
CPRA RESULT		4,000	

Tableau 7 : CPRA

- **CPTA-50**

		V _{Impact} (km/h)	
CPNC-50	Vitesse	Farside turn	Nearside turn
	10 km/h	10,65	0,00
	15 km/h	12,54	
	20 km/h	20,40	
CPTA-50 RESULT		1,000	

Tableau 8 : CPTA-50

- **CPLA-50**

		Daytime		Night-time	
CPLA-50	Vitesse	V _{Impact} (km/h)	Note	V _{Impact} (km/h)	Note
	20 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	25 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	30 km/h	0,00	1,000	0,00	1,000
	35 km/h	0,00	2,000	0,00	2,000
	40 km/h	0,00	2,000	0,00	2,000
	45 km/h	4,56	3,000	5,87	3,000
	50 km/h	8,12	3,000	9,75	3,000
	55 km/h	11,54	3,000	10,00	3,000
	60 km/h	14,66	2,000	13,84	2,000
CPLA-50 RESULT		18,000		18,000	

Tableau 9 : CPLA-50

- **CPLA-25**

		Daytime		Night-time	
CPLA-25	Vitesse	TTC _{FCW}	Points	TTC _{FCW}	Points
	50 km/h	0,00	3,000	0,00	0,000
	55 km/h	0,00	3,000	4,69	3,000
	60 km/h	4,69	2,000	8,94	2,000
	65 km/h	8,94	0,934	16,50	1,000
	70 km/h	16,50	0,823	20,75	1,000
	75 km/h	20,75	1,000	24,70	1,000
	80 km/h	24,70	1,000	0,00	0,000
CPLA-25 RESULT		11,757		8,000	

Tableau 10 : CPLA-25

En résumé l'ensemble des résultats présentés donne le tableau récapitulatif suivant :

SUMMARY	DAYTIME	NIGHT-TIME
CPFA-50	95,0%	
CPNA-25	95,0%	90,0%
CPNA-75	100,0%	100,0%
CPNC-50	100,0%	
CPLA	99,2%	86,7%
CPTA	25,0%	
CPRA	100,0%	

Tableau 11 : Résumé des essais AEB

En termes de notation, la plateforme de simulation obtient la note totale de 7.9 sur un total de 9 avec la répartition suivante :

TOTAL	7,9
Daytime	5,2
Night-time	2,7

Tableau 12 : Note globale des essais AEB

En comparaison, la notation officielle de l'EuroNCAP disponible sur le site internet³ est de 7 sur un total de 9. La référence est présentée en Figure 23, l'ordre de grandeur entre les notes obtenues en simulation et en essais physiques est très proche, ce qui permet de confirmer la simulation dans sa représentativité du véhicule portant la fonction modèle AEB comme valide vis-à-vis des critères majeurs de l'EuroNCAP :

- Collision
- Vitesse d'impact
- Vitesse relative (VUT et GVT)

$$Score_{test\ speed} = ((V_{rel_test} - V_{rel_impact}) / V_{rel_test}) \times points_{test\ speed}$$

Where:

V_{rel_test} Theoretical relative test speed

V_{rel_impact} Measured relative impact speed

Équation 1 : Calcul du score NCAP

³ <https://www.euroncap.com/fr>

Il est important de préciser que les points sont définis sur une base de réussite/échec pour les scénarios avec une vitesse supérieure à 40km/h. Les points sont délivrés lorsqu'une réduction d'à minima 20km/h est observée.

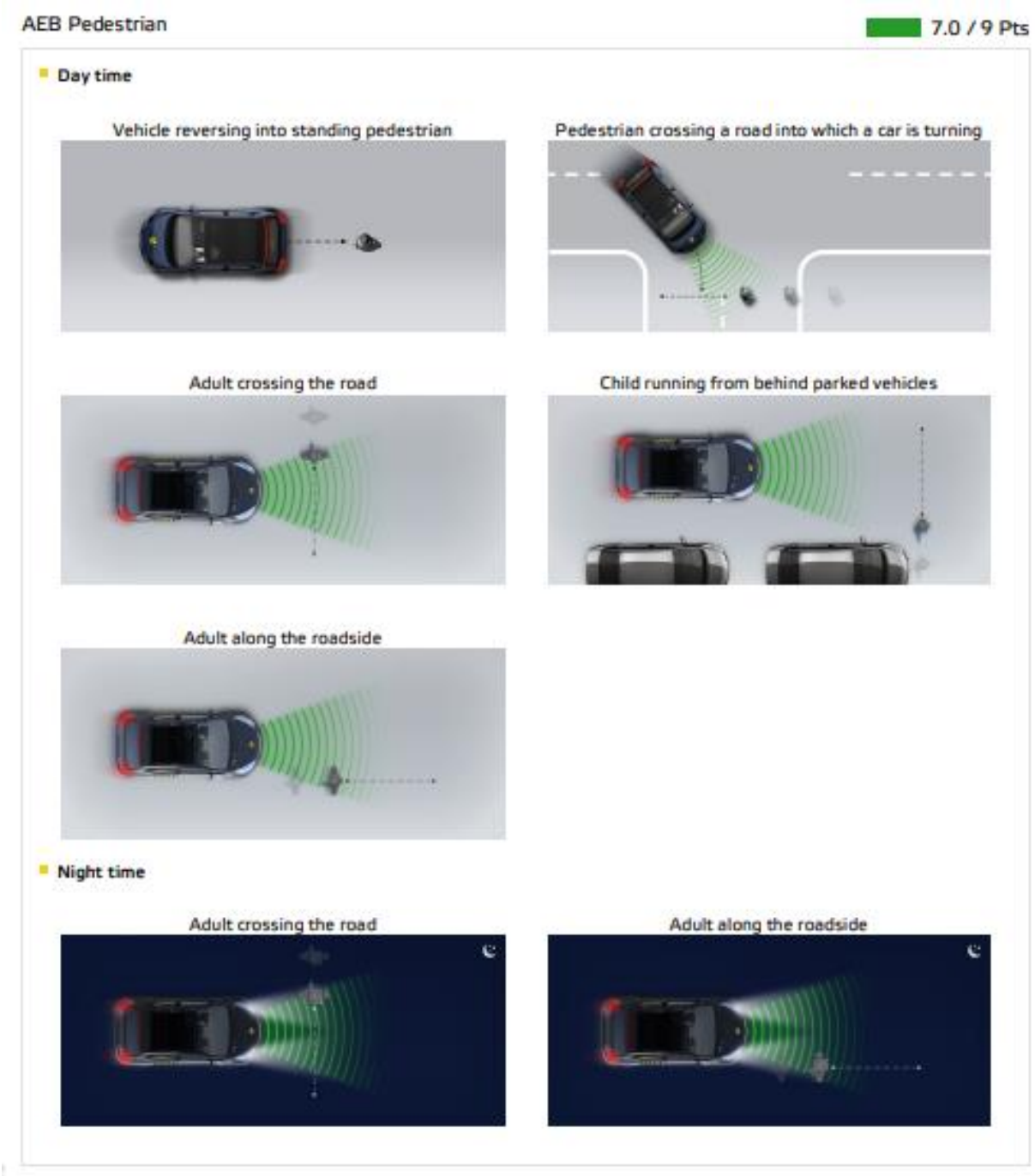


Figure 23 : Note EuroNCAP Mégane E-Tech 2022

Conclusion

Le document ci-présent a présenté la méthodologie de simulation numérique apportée en réponse aux besoins de validation par la simulation. La complexité croissante des systèmes de chauffeurs autonomes et de leurs environnements nécessite une méthodologie précise pour outiller les utilisateurs et permettre la validation des systèmes.

La méthodologie développée offre un processus complet de simulation avec des outils spécifiques prêts à l'usage. En effet, d'autres acteurs⁴ de l'automobile ont déjà partagées des méthodologies similaires plus ou moins outillées, l'objectif ici est d'apporter une solution complète avec des preuves de sa capacité à valider un système AD/ADAS. La méthodologie outillée permet ainsi de palier certaines limitations connues de la simulation.

Tout d'abord, la précision vis-à-vis d'un essai physique est démontrée et quantifiée grâce à l'étape de corrélation. Les indicateurs et méthodes utilisés définissent un domaine de validité de la simulation et confirment les résultats obtenus sur les cas de tests inclus dans le domaine de validité.

Ensuite, les modèles de simulation doivent obéir aux lois physiques réelles, les modèles dynamiques sont ici décrits par des modèles éprouvés. Les lois de commandes sont issues de modèle déjà existants ou alors directement intégrés à la boucle de simulation. L'outil de simulation est comparé dans différentes étapes du processus ce qui permet de limiter le nombre de modèles ne correspondant pas aux modèles réels (capteurs). Pour ces derniers modèles, le choix des cas d'usage est crucial. En effet, dans le cas développé précédemment, les scénarios EuroNCAP permettent, grâce à un protocole rigoureux, de limiter l'effet des modèles de capteurs et de l'environnement extérieur.

Néanmoins la méthodologie proposée est, comme indiqué précédemment, outillée. Cela signifie que des outils de simulation et des interfaces spécifiques ont été nécessaires au bon déroulement de la méthodologie. L'objectif du lot 2.4 du projet SAM étant au départ de proposer une méthodologie, de l'outiller et de la tester. Mais, dans l'idéal, une méthodologie de simulation devrait être générique et pouvoir être appliquée à l'ensemble des utilisateurs. Un travail préparatoire à une telle méthodologie a donc été mené dans le livrable 2.4-3 [DR01] afin de proposer une plateforme de simulation générique. La méthodologie utilisant une telle plateforme couvrirait ainsi un ensemble de cas d'usage et de diversité de processus la rendant pratiquement universelle. Malheureusement, les modèles et formats standards ne sont pas encore suffisamment utilisés dans les processus existants, mais dans un avenir proche on peut espérer reprendre la méthodologie proposée dans le document et élargir son champ d'action.

⁴ Projets SET-LEVEL & PEGASUS

Références

1. **Zwillinger, D. and Kokoska, S.** *Standard Probability and Statistics Tables and Formulae*. New York : Chapman & Hall, 2000.
2. **Frechet, M Maurice.** *Sur quelques points du calcul fonctionnel*. 1906.
3. **Eiter, Thomas et Mannila, Heikki.** *Computing discrete Frechet distance*. 1994.
4. **Anne Driemel, Sarel Har-Peled, Carola Wenk.** *Approximating the Frechet Distance for Realistic Curves in Near Linear Time*. 2012.
5. *Computing the Frechet Distance Between Two Polygonal Curves.* **Helmut Alt, Michael Godau.** 1995, International Journal of Computational Geometry & Applications, pp. 75-91.
6. *Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series.* **Donald J Berndt, James Clifford.** 1994. 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. pp. 359-370.
7. **François Petitjean, Alain Ketterlin, Pierre Gancarski.** *A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering*. 2011.
8. **Stan Salvador, Philip Chan.** *Toward Accurate Dynamic Time Warping in Linear Time and Space*. 2007.