



L4.3 Développement des modèles et outils de simulation (des interactions VA / VL Conventionnel)

Work Package	4
Responsable du WP, affiliation	JUDALET V., VEDECOM
Livable n°	L4.3
Version	V1
Auteur responsable du livrable	JUDALET V. (VEDECOM) & BELLET T. (Université Eiffel)
Auteurs, affiliations	VEDECOM : Vincent JUDALET Université Eiffel (LESCOT) : Thierry BELLET
Relecteurs, affiliations	LAB : Henri CHAJMOWICZ CEESAR : Jacques SAADE
Statut du livrable	Version finale

Veillez citer ce document de cette façon :

Judalet V., Bellet T. (2021), *Livrable SURCA 4.3 : Développement des modèles et outils de simulation (des interactions VA / VL Conventionnel)*, Projet Surca, financé par la FSR et la DSR, 40 p.

Historique des versions

Version	Date	Auteurs	Type des changements
V1	20/10/2021	Thierry BELLET	Draft 1: Structure générale et Contenu du livrable
V2	27/05/2022	Vincent JUDALET / Thierry BELLET	Draft2: Version soumise pour relecture finale
V3	30/05/2022	Vincent JUDALET / Thierry BELLET	Version finale

Remerciements

Le Projet SURCA est financé par la dévolution de la Fondation Sécurité Routière à l'IFSTTAR/Université Gustave Eiffel.

Résumé

Ce livrable présente les travaux réalisés dans le cadre de la tâche 4.3 du projet SURCA. Synthétiquement, l'objectif de cette tâche était de concevoir puis de développer une plateforme de simulation mettant aux prises un Véhicule Automatisé (VA) virtuel avec un Véhicule Léger (VL) conventionnel piloté par un modèle de conducteur, afin de simuler des scénarios d'interactions et d'appréhender, par anticipation, des situations d'accidents susceptibles de se produire dans l'avenir lorsqu'un véhicule autonome sera immergé dans le trafic (forcément mixte, au moins dans les premières années de déploiement des VA). Au final, l'enjeu principal était de démontrer la faisabilité d'un tel outil de simulation numérique (i.e. selon une démarche dite de « *Preuve de Concept* ») en se focalisant sur un scénario d'intérêt particulier, i.e. le rabattement d'un VL devant le VA, permettant d'appréhender les réactions du VA lorsque celui-ci sera confronté à des comportements de conduite plus ou moins dangereux (i.e. comme la conséquence d'erreurs de conduite involontaires ou d'un style de conduite délibérément « agressif » ou « à risque ») de la part de conducteurs humains avec lesquels il partagera la route.

Après avoir rappelé synthétiquement le contexte et les objectifs des travaux à réaliser dans la tâche 4.3 (section 1, p.10), la seconde section du livrable (p. 12) présentera la méthodologie déployée pour la sélection d'un scénario d'interaction VA-VL comme « cas d'usage » à privilégier à des fins de simulation numérique (i.e. le rabattement d'un VL devant le VA). La troisième section (p. 15) sera focalisée sur les résultats attendus dans cette tâche 4.3, à savoir le développement de la plateforme de « co-simulation intégrée des interactions VA-VL » reposant sur différentes applications logicielles, avec un focus particulier sur les développements réalisés pour interfacier cet outil de simulation avec, d'un côté, un VA virtuel piloté par les algorithmes d'un véritable VA de VEDECOM et, de l'autre côté, le modèle de conducteurs COSMODRIVE, en charge de simuler des comportements de rabattement selon différents profils de conducteurs de VL (plus ou moins agressifs, âgés et/ou (in)expérimentés). La quatrième section (p. 33) sera consacrée à la présentation de quelques exemples de démonstrations de co-simulations réalisées au moyen de la plateforme SURCA développée durant le projet, permettant d'évaluer la façon dont le VA virtuel gère des comportements de conduite « critiques » ou « dangereux », simulés au moyen de COSMODRIVE. Enfin, la dernière section de conclusion (section 5, p. 38) synthétisera les travaux réalisés et introduira quelques perspectives de futures recherches susceptibles d'être ouvertes par la plateforme de co-simulation SURCA.

Table des matières

1. Introduction : Contexte et objectifs de la recherche	10
1.1. Objectifs du projet SURCA : anticiper l'arrivée des VA sur les routes.....	10
1.2. Objectifs du WP4 : Etudier des futures interactions VA-VL	10
1.3. Objectifs de la tâche 4.3 : démontrer la faisabilité et l'intérêt du recours à la simulation numérique pour anticiper les futures interactions VA-VL	11
2. Méthodologie	12
2.1. Identification de scénarios d'interactions VA-VL potentiellement critiques	12
2.2. Scénario d'intérêt retenu comme « cas d'usage » pour l'étude des futures interactions VA-VL au moyen de la simulation numérique	13
2.3. Spécification de la plateforme de co-simulation SURCA pour l'étude des interactions VA-VL .	14
2.4. Conception de la plateforme de « Co-Simulation » des interactions VA-VL.....	15
2.4.1. Le Véhicule Autonome de VEDECOM et ses algorithmes	16
2.4.2. Le modèle de simulation de conducteurs COSMODRIVE de l'Université Eiffel	18
2.4.3. L'outil logiciel Pro-SiVIC (ESI Group).....	19
2.4.4. L'outil logiciel RTMaps (Intempora)	20
3. Résultats: Développement de la plateforme de co-simulation conçue et développée pour SURCA	21
3. 1. Architecture fonctionnelle de la plateforme de co-simulation.....	21
3.2. Développements réalisés pour la simulation du scénario d'interactions VA-VL	23
3.3. Développements réalisés pour la simulation du VA de VEDECOM	24
3.4. Développements réalisés pour la simulation de différents profils de conducteurs de VL au moyen du modèle COSMODRIVE	26
4. Démonstration de faisabilité : 3 exemples de co-simulation des interactions VA-VL au moyen de la plateforme SURCA.....	33
4.1. Gestion d'une situation d'accident se produisant devant le VA	34
4.2. Gestion d'une erreur de conduite typique d'un conducteur âgé	35
4.3. Gestion d'une erreur de conduite typique d'un conducteur novice.....	36
5. Conclusion : Bilan et perspectives	38
6. Références.....	40

Table des Figures

Figure 1 : Pictogramme SURCA du scénario d'intérêt retenu pour la simulation numérique en tâche 4.3.....	13
Figure 2 : Scénario d'intérêt identifié comme « cas d'usage » pour la co-simulation numérique des interactions VA-VL.....	14
Figure 3 : Spécification de la plateforme de Co-Simulation pour l'étude des interactions VA-VL.....	15
Figure 4 : Le véhicule expérimental VEDECOM lors du congrès ITS 2017 à Strasbourg	16
Figure 5: Technologies et algorithmes intégrés au véhicule expérimental VEDECOM.....	17
Figure 6: Le modèle de conducteurs COSMODRIVE.....	18
Figure 7: L'outil Pro-SiVIC (développement de fonctions de perception embarquées)	19
Figure 8 : Exemple d'interface graphique du logiciel RTMaps	20
Figure 9 : Architecture fonctionnelle de la plateforme de co-simulation SURCA	21
Figure 10 : Simulation du scénario d'interaction VA-VL sur la plateforme de co-simulation SURCA ...	23
Figure 11 : les 4 étapes de la situation de rabattement de COSMODRIVE, vécues à bord du véhicule autonome	24
Figure 12 : Interfaçage des algorithmes du VA de VEDECOM avec Pro-SiVIC, via RTMaps, pour la simulation du VA dans la plateforme de co-simulation SURCA	25
Figure 13 : Interfaçage des logiciels RTMaps et Pro-SiVIC pour piloter le VA dans la plateforme de co-simulation SURCA.....	25
Figure 14 : Interfaçage du modèle COSMODRIVE et de Pro-SiVIC pour piloter le VL dans la plateforme de Co-Simulation	26
Figure 15 : Trois variantes de la manœuvre de « queue de poisson » simulée avec COSMODRIVE	27
Figure 16 : Simulation d'un accident du VL piloté par COSMODRIVE avec le véhicule précédant le VA VEDECOM	28
Figure 17 : Exemple réel d'erreur typique d'un conducteur âgé ayant des difficultés pour apprécier les distances en situation de rabattement (extrait de Bellet et al, 2021)	29
Figure 18 : Simulation d'une d'erreur de conduite typique des conducteurs âgés, lorsque ceux-ci ont des difficultés pour apprécier les distances des autres véhicules via leurs rétroviseurs, en situation de rabattement sur voie rapide	30
Figure 19 : Exemple de perte de contrôle par un conducteur novice lors d'un rabattement sur voie rapide, engagé de façon mal maîtrisée (coup de volant un peu trop brutal) en raison d'une vitesse excessive.....	32
Figure 20 : Visualisation sur RTMaps de la vitesse et de l'accélération du VA VEDECOM pendant les 20 premières secondes des scénarios d'interactions VA-VL.....	33
Figure 21 : Réaction du VA VEDECOM (freinage) lors de la survenue d'un accident de COSMODRIVE	34

Figure 22 : Gestion d'un rabattement dangereux (erreur typique d'un conducteur âgé) par le VA de VEDECOM 35

Figure 23: Gestion d'un rabattement dangereux (perte de contrôle d'un conducteur novice) par le VA de VEDECOM 37

1. Introduction : Contexte et objectifs de la recherche

1.1. Objectifs du projet SURCA : anticiper l'arrivée des VA sur les routes

L'objectif général du projet SURCA est de contribuer à une meilleure intégration des Véhicules Autonomes/Automatisés (VA) dans la circulation, lorsque ceux-ci apparaîtront sur les routes. Il s'agit ainsi, à partir d'une analyse des situations de conduite actuelles, de se « projeter dans l'avenir » afin d'identifier des bénéfices et des risques potentiels susceptibles d'émerger lors de l'introduction des VA dans le trafic.

Comment les situations critiques et les accidents de la route qui se produisent aujourd'hui seront-ils gérés par les véhicules automatisés de demain ? Comment se passeront les interactions avec les autres usagers de la route, au premier rang desquels les véhicules conduits manuellement par des humains ? L'automatisation de la conduite contribuera-t-elle à accroître la sécurité routière ou, à l'inverse, sera-t-elle source d'accidents ?

Autant de questions que le projet SURCA vise à explorer, en vue de pouvoir *in fine* suggérer des recommandations aux concepteurs de véhicules automatisés et/ou autonomes quant à leurs stratégies d'interactions et à leurs capacités d'adaptation aux comportements des autres usagers, afin de garantir des conditions de conduite sûres et apaisées.

1.2. Objectifs du WP4 : Etudier des futures interactions VA-VL

Dans ce contexte général, les objectifs poursuivis de façon plus spécifique dans le WP4 de SURCA portent sur l'analyse prospective des futures interactions entre un Véhicule Léger (VL) conventionnel (c'est-à-dire un véhicule automobile piloté par un conducteur humain) et un futur Véhicule Automatisé.

A cette fin, 3 tâches complémentaires ont été déployées dans ce WP:

- Dans le cadre de la tâche 4.1, l'objectif était – à partir de l'analyse des situations d'incidents et/ou d'accidents VL-VL se produisant aujourd'hui sur les routes - de définir les situations d'interactions VA-VL à privilégier dans le cadre du WP4 de SURCA.
- Dans le prolongement de la tâche 4.1, la tâche 4.2 a permis d'identifier des « scénarios d'intérêt » à investiguer plus en profondeur en termes d'analyse des risques d'accidents entre les futurs VA et les VL conventionnels.
- Enfin, dans le prolongement des tâches 4.1 et 4.2, la tâche 4.3 visait à se focaliser sur l'un de ces scénarios d'intérêt comme un « cas d'usage » permettant d'explorer les bénéfices potentiels d'un recours à la simulation numérique pour appréhender - par anticipation - les futures situations d'interactions VA-VL d'une façon virtuelle.

1.3. Objectifs de la tâche 4.3 : démontrer la faisabilité et l'intérêt du recours à la simulation numérique pour anticiper les futures interactions VA-VL

D'une façon plus détaillée, les travaux réalisés dans la tâche 4.3 visaient à s'appuyer, d'un côté, sur les compétences de VEDECOM en matière de Véhicules Autonomes/Automatisés (l'institut disposant de plusieurs véhicules de ce type) et, de l'autre côté, sur les travaux du LESCOT consacrés à l'analyse des erreurs de conduite et à la modélisation cognitive du conducteur automobile via le développement du modèle de simulation de conducteurs « COSMODRIVE » (pour *COgnitive Simulation MOdel of the DRIVER*, cf. Bellet et al, 2003, 2011, 2019).

Sur la base de ces expertises, l'objectif était de recourir à la simulation numérique afin d'étudier virtuellement les interactions entre un VL conventionnel, piloté par le modèle de conducteurs COSMODRIVE, et un Véhicule Autonome virtuel, reproduisant sur machine les décisions et les comportements d'un véritable VA de VEDECOM.

Pour atteindre cet objectif, il était nécessaire de concevoir et de développer une plateforme de simulation « intégrée » combinant le VA virtuel de VEDECOM et le modèle COSMODRIVE du LESCOT, et permettant de lancer des scénarios d'interactions afin d'appréhender, par la simulation numérique, les risques d'accidents susceptibles de se produire dans l'avenir lorsqu'un véhicule autonome sera confronté à différents profils de conducteurs (simulés via une calibration *ad hoc* du modèle COSMODRIVE), notamment lorsque ceux-ci adopteront un comportement de conduite « critique » ou « dangereux » (i.e. comme conséquence d'erreurs involontaires ou résultant d'un style de conduite délibérément « agressif » ou « à risque »).

Compte tenu des ressources limitées attribuées à cette tâche, l'ambition n'était pas de pouvoir utiliser cette plateforme durant le projet SURCA à des fins de « simulations massives » (i.e. simuler de multiples interactions entre de multiples véhicules automatisés *versus* pilotés manuellement) mais, plus modestement, de :

- 1) **Démontrer la faisabilité d'un tel outil de co-simulation numérique** (i.e. selon une démarche dite de « *Preuve de Concept* ») en se focalisant sur un scénario d'intérêt particulier (à définir dans le cadre des travaux réalisés en tâches 4.1 et 4.2) mettant aux prises le futur VA avec différents profils de conducteurs humains.
- 2) **Explorer, au moyen de démonstrations, les apports potentiels de cette démarche de simulation virtuelle pour évaluer - de façon prospective - les capacités d'un futur VA à gérer de manière sûre ses interactions avec des conducteurs humains de VL**, y compris lorsque ceux-ci se comporteront d'une façon dangereuse.

2. Méthodologie

La méthodologie déployée dans le WP4, en vue d'étudier les futures interactions VA-VL au moyen de la simulation virtuelle, s'est organisée selon 3 étapes successives :

- 1) **L'identification de situations d'interactions VL-VL** (cf. tâches 4.1 et 4.2) posant aujourd'hui des problèmes de sécurité routière et, par conséquent, nécessitant d'être gérées adéquatement dans l'avenir par les algorithmes des VA, lors de leur introduction sur les routes.
- 2) **La sélection d'un « scénario d'intérêt » particulier** comme « **cas d'usage** » à privilégier en tâche 4.3 pour l'étude prospective des futures interactions VA-VL au moyen de la simulation numérique (en prenant en compte les domaines d'expertises des partenaires impliqués mais aussi les contraintes techniques et budgétaires).
- 3) **La spécification de la plateforme de simulation numérique** à concevoir puis à développer dans la tâche 4.3 afin de pouvoir explorer virtuellement, sous la forme de **démonstrations réalistes** (i.e. reproduisant de la façon la plus fidèle possible les comportements d'un VA réel comme ceux de véritables conducteurs humains pilotant un VL), les futures interactions VA-VL correspondant à ce « cas d'usage ».

2.1. Identification de scénarios d'interactions VA-VL potentiellement critiques

Les travaux réalisés dans le cadre des tâches 4.1 et 4.2 ont permis d'identifier un certain nombre de scénarios d'interactions critiques susceptibles de se produire entre un futur Véhicule Automatisé et un Véhicule Léger (VL) conduit par un conducteur humain.

A partir des situations d'accidents VL-VL disponibles dans les bases de données VOIESUR et FLAM, une première analyse « macro » a été réalisée par les partenaires du WP4 pour identifier les scénarios dont les enjeux sécuritaires apparaissaient comme les plus pertinents en matière de futures interactions VA-VL. Cette analyse a reposé sur l'évaluation de ces interactions selon quatre critères principaux et complémentaires :

- Ce scénario est-il fréquemment rencontré aujourd'hui sur les routes lors des interactions entre plusieurs VL pilotés par des humains (plus un scénario sera fréquent, et plus il sera nécessaire pour le VA de savoir bien le gérer) ?
- Si tel est le cas, génère-t-il souvent des situations de conflits, d'incidents, voire d'accidents entre les conducteurs humains (plus un scénario sera source de conflits et d'incidents aujourd'hui, et plus il sera nécessaire d'évaluer la capacité du VA à y faire face dans l'avenir)?
- Par ailleurs, nécessite-t-il une intervention humaine « décisive » de l'un ou de l'autre des conducteurs de VL en interaction pour éviter l'accident (i.e. capacités d'interventions dont il serait par conséquent essentiel de doter les VA afin qu'ils puissent gérer adéquatement leurs futures interactions avec les autres VL) ?
- Enfin, est-ce que ce scénario est « challengeant » pour le VA, c'est-à-dire susceptible de poser des difficultés particulières aux algorithmes de l'automate qu'il conviendrait d'évaluer virtuellement afin de s'assurer de leur capacité à garantir la sécurité des interactions VA-VL (notamment lorsque le VA sera confronté à des styles de conduite et/ou à des comportements humains atypiques ou dangereux) ?

Une deuxième analyse plus « micro » a ensuite été réalisée sur chaque scénario afin de mieux cerner les paramètres à prendre en compte pour garantir la sécurité routière lors de l'introduction des VA dans le trafic et pour identifier les risques de conflits, d'incidents ou d'accidents susceptibles de se produire dans ces situations d'interactions VA-VL.

La méthodologie déployée et les résultats obtenus à l'issue de ce processus d'analyse sont détaillés dans le livrable SURCA L4.1. Synthétiquement, ces travaux ont permis d'identifier quatre « scénarios d'intérêt » plus particulièrement pertinents en matière d'interactions VA-VL et susceptibles d'être retenus comme « cas d'usage » à des fins de simulation numérique en T4.3:

- 1) **Scénario 1:** Les situations de franchissement d'intersections, notamment lorsque le VA décide de s'arrêter alors qu'il est suivi de près par un VL (avec un risque de collision arrière en cas de freinage trop brutal ou inattendu de la part du VA).
- 2) **Scénario 2:** Les situations de franchissement de giratoires, et plus particulièrement lors des phases d'insertion (du VL et/ou du VA) et de sortie du rond-point.
- 3) **Scénario 3:** Les situations où le VL exécute une insertion sur une voie principale devant un VA circulant déjà sur cette dernière ou, inversement, lorsqu'un VA doit s'insérer en présence d'un VL circulant sur la voie principale.
- 4) **Scénario 4:** Les situations de changements de voies (notamment sur voies rapides ou sur autoroutes), et plus particulièrement lorsqu'un VL réalise délibérément (conduite « agressive ») ou involontairement (en raison de difficultés de conduite et/ou suite à une erreur humaine) un rabattement dangereux devant le VA (i.e. « queue de poisson »).

2.2. Scénario d'intérêt retenu comme « cas d'usage » pour l'étude des futures interactions VA-VL au moyen de la simulation numérique

Au vu des contraintes de faisabilité technique des simulations numériques (i.e. disponibilité d'algorithmes capables de gérer cette situation d'interaction dans le VA de VEDECOM et aptitude du modèle COSMODRIVE à reproduire des décisions et des comportements de conduite variés correspondant à différents profils de conducteurs humains), les partenaires du WP4 ont finalement sélectionné le 4^{ème} scénario d'intérêt (changement de voie avec rabattement d'un VL devant le VA) comme « cas d'usage » à privilégier pour la simulation numérique en tâche 4.3. Cette situation d'interaction se réfère au scénario SURCA V108 (présenté en Figure 1 sous la forme de son pictogramme) dans le cadre duquel le véhicule bleu (un VL aujourd'hui, mais hypothétiquement un VA dans l'avenir) circule dans sa voie à une vitesse constante, tandis qu'un autre VL le dépasse par la gauche puis se rabat devant lui d'une façon critique (« queue de poisson » plus ou moins proche et/ou agressive).

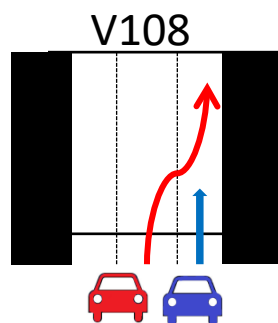


Figure 1 : Pictogramme SURCA du scénario d'intérêt retenu pour la simulation numérique en tâche 4.3

La Figure 2 présente ce scénario d'intérêt générique tel qu'il devra être simulé numériquement sur la plateforme SURCA afin d'étudier différentes instances d'interactions VA-VL. Dans cette situation de conduite sur voie rapide (e.g. autoroute urbaine à 2 fois 2 voies), le véhicule rouge - supposé être le Véhicule Autonome de VEDECOM - circule sur la voie de droite à une vitesse de croisière de 90 km/h (en maintenant une distance de sécurité avec le véhicule qui le précède), immergé au milieu d'un trafic composé de véhicules légers (VL) pilotés manuellement par des conducteurs humains.

Parmi ces VL, l'un d'entre eux - le véhicule jaune piloté par le modèle COSMODRIVE – décide de dépasser le VA sur la voie de gauche, puis de se rabattre devant lui.

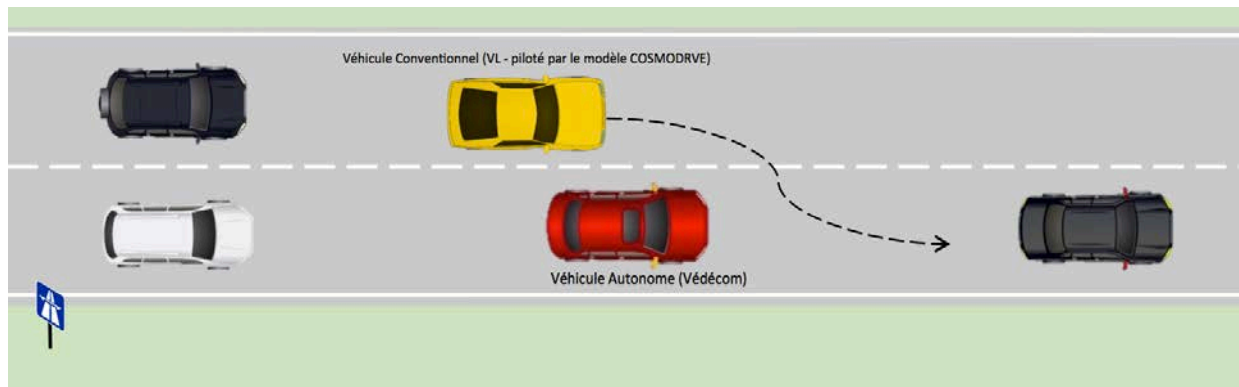


Figure 2 : Scénario d'intérêt identifié comme « cas d'usage » pour la co-simulation numérique des interactions VA-VL

Ce scénario banal, qui se produit très fréquemment sur les routes à chaussées séparées en cas de trafic dense (notamment lorsque les véhicules doivent changer de voie pour s'orienter vers une bifurcation ou une future sortie) peut néanmoins devenir problématique en cas de rabattement trop agressif (e.g. volonté délibérée du VL de faire une « queue de poisson » au VA, par exemple) voire dangereux (en cas d'erreurs de conduite de la part du conducteur du VL induites par une vitesse excessive ou par une mauvaise estimation des distances de sécurité lors de la manœuvre de rabattement, par exemple).

2.3. Spécification de la plateforme de « co-simulation » SURCA pour l'étude des interactions VA-VL

Pour pouvoir simuler numériquement ce scénario d'intérêt et étudier virtuellement différentes variantes d'interactions VA-VL, il est nécessaire de disposer d'une plateforme de « co-simulation » (Figure 3) permettant de mettre aux prises (1) un VA piloté par les véritables algorithmes d'un VA de VEDECOM avec (2) différentes instances de COSMODRIVE en charge de simuler plusieurs profils de conducteurs de VL. Dès lors, il deviendra possible d'utiliser cette plateforme pour tester les réactions du VA lorsque celui-ci sera effectivement confronté à ces différents profils de conducteurs virtuels, et de vérifier ainsi les capacités de l'automate à gérer ces interactions de façon appropriée et sécuritaire.

Durant ce scénario d'intérêt, le véhicule autonome (de même que tous les autres véhicules) devra tout d'abord accélérer pour atteindre une vitesse de croisière de 90km/h, puis il devra suivre un véhicule tiers (véhicule noir dans la Figure 2) en maintenant une distance inter-véhiculaire sécuritaire calculée par son algorithme de régulation de suivi.

De son côté, le VL dépassant le VA puis se rabattant devant lui (i.e. entre le VA et le véhicule noir qui le précède) devra être piloté par le modèle de conducteurs COSMODRIVE. Pour chaque simulation, COSMODRIVE sera calibré selon différents profils de conducteurs susceptibles de prendre (ou non) des décisions critiques et d'adopter (ou non) des comportements à risque. Au final, l'enjeu sera de pouvoir

réaliser cette manœuvre de différentes manières, selon que le modèle représentera un conducteur de VL ayant un style de conduite plus ou moins agressif (manœuvre de rabattement plus ou moins brutale et proche du VA). Mais il s'agira aussi de chercher à simuler certaines erreurs de conduite typiques de certains groupes de conducteurs, comme les plus âgés (ayant parfois des difficultés pour estimer les vitesses et les distances de sécurité via leurs rétroviseurs avant de se rabattre ; cf. Paris et al, 2014 ; Bellet et al, 2021) ou des conducteurs novices inexpérimentés (susceptibles de prendre de mauvaises décisions et de mal maîtriser leur véhicule lors de la réalisation du rabattement).

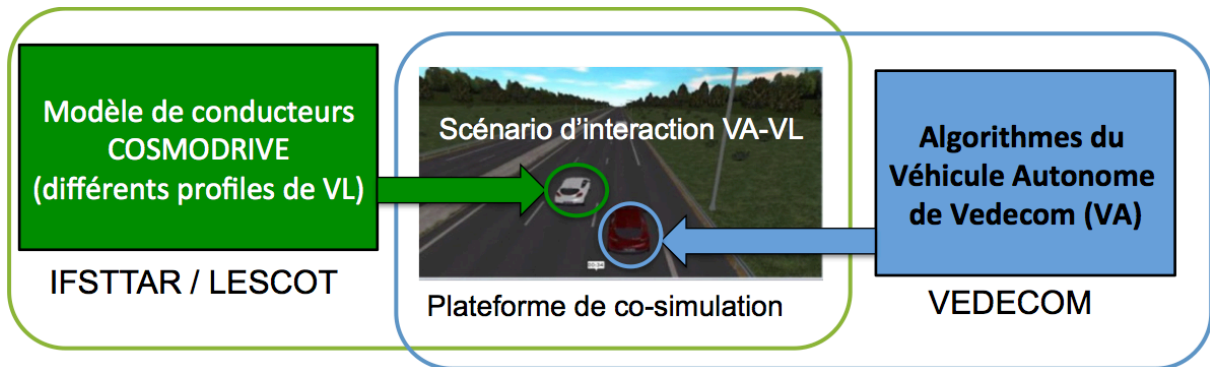


Figure 3 : Spécification de la plateforme de Co-Simulation SURCA pour l'étude des interactions VA-VL

Face à ces manœuvres de rabattement plus ou moins critiques, le VA VEDECOM devra adapter son comportement pour garantir la sécurité de ses occupants. Il devra notamment adapter son allure pour maintenir une distance de sécurité avec le VL piloté par COSMODRIVE, voire freiner avec plus ou moins d'intensité pour gérer le risque de collision, en cas de manœuvres de changement de voie inappropriées de la part du VL. Pour pouvoir évaluer pleinement les capacités de réaction du VA, certaines variations de notre scénario d'intérêt viseront à simuler des erreurs de conduite particulièrement dangereuses susceptibles de déboucher sur des situations d'accidents VA-VL (en cas de réaction trop tardive ou de freinage insuffisant de la part du VA, par exemple).

2.4. Conception de la plateforme de « Co-Simulation » des interactions VA-VL

Pour bâtir la plateforme de co-simulation SURCA, quatre applications logicielles complémentaires ont été intégrées :

- 1) Les algorithmes du VA de VEDECOM, pour permettre de piloter le VA virtuel de la simulation à la façon dont un véritable VA se comporterait effectivement sur la route,
- 2) le modèle COSMODRIVE, pour pouvoir piloter un VL amené à se rabattre devant le VA en simulant différents profils de conducteurs et/ou erreurs de conduite,
- 3) le logiciel Pro-SiVIC, pour développer un environnement de simulation 3D, piloter les véhicules tiers et simuler le scénario d'interaction correspondant à notre scénario d'intérêt,
- 4) le logiciel RT-Maps, pour connecter les algorithmes de conduite du VA de VEDECOM avec Pro-SiVIC et prendre ainsi le contrôle du VA dans notre scénario d'intérêt.

Dans cette section, nous allons présenter synthétiquement ces quatre applications logicielles telles qu'elles existaient avant le projet SURCA (« l'existant antérieur » sur lequel nous nous sommes appuyés pour concevoir et réaliser la plateforme de co-simulation), puis nous présenterons dans la section 3 (cf. Résultat) la « plateforme de co-simulation intégrée SURCA » développée spécifiquement dans le WP4 pour les démonstrations d'interactions VA-VL.

2.4.1. Le Véhicule Autonome de VEDECOM et ses algorithmes

Dans le cadre de ses activités de recherche autour de la conduite automatisée, l'institut VEDECOM a développé des véhicules expérimentaux sur la base de Renault Zoé. Ces véhicules intègrent l'ensemble des technologies et des algorithmes pour permettre un niveau d'automatisation maximal (jusqu'au niveau 5, selon la terminologie de la SAE). Ces véhicules ont reçu l'autorisation de rouler sur route ouverte en mode « conduite autonome » dans le cadre d'expérimentations ou de démonstrations. Ces véhicules ont notamment été mis en œuvre pour la démonstration d'un « service de mobilité autonome à la demande » présentée lors du 12ème Congrès Européen sur les ITS à Strasbourg, en 2017 (cf. photo en Figure 4). Cette expérimentation associait deux technologies de pointe : un démonstrateur à conduite déléguée et un service de transport à la demande. Ce service expérimental sur route ouverte en zone urbaine, entre la France et l'Allemagne, a été testé par une centaine de personnes, qui pour la 1ère fois ont pu vivre un transport en « Robot Taxi » sans conducteur.



Figure 4 : Le véhicule expérimental VEDECOM lors du congrès ITS 2017 à Strasbourg

Les algorithmes de perception de l'environnement implémentés sur ce véhicule pour permettre une conduite automatisée (cf. Figure 5) analysent les données fournies par des capteurs extéroceptifs (caméras, radars et Lidars), proprioceptifs (centrale inertielle, odomètres) ou situés dans l'habitacle (driver monitoring), et fournissent au véhicule les informations suivantes nécessaires à la conduite :

- L'infrastructure : la signalisation horizontale et verticale, position des marquages, etc.
- Les obstacles fixes et mobiles : position, type (piéton, véhicule, 2RM, etc.), dimension, trajectoire, etc
- Etat du véhicule : vitesse, accélération, vitesse en lacet, etc.
- Les données météorologiques : pluie, verglas, vent, etc.

La localisation permet de situer le véhicule sur une carte en fonction de ses coordonnées GPS. La précision demandée est de l'ordre de 10cm, ce qui nécessite l'utilisation d'un GPS différentiel. La localisation permet d'enrichir les données de perception par les données présentes *a priori* dans une carte, notamment les éléments de l'infrastructure et l'état du trafic.

Ces données sont enfin complétées par la communication Véhicule-Infrastructure (V2I) selon le protocole 802.11p. Des unités de bord de route (UBR) peuvent ainsi envoyer au véhicule l'état des éléments de l'infrastructure (comme la couleur des feux tricolores, par exemple).

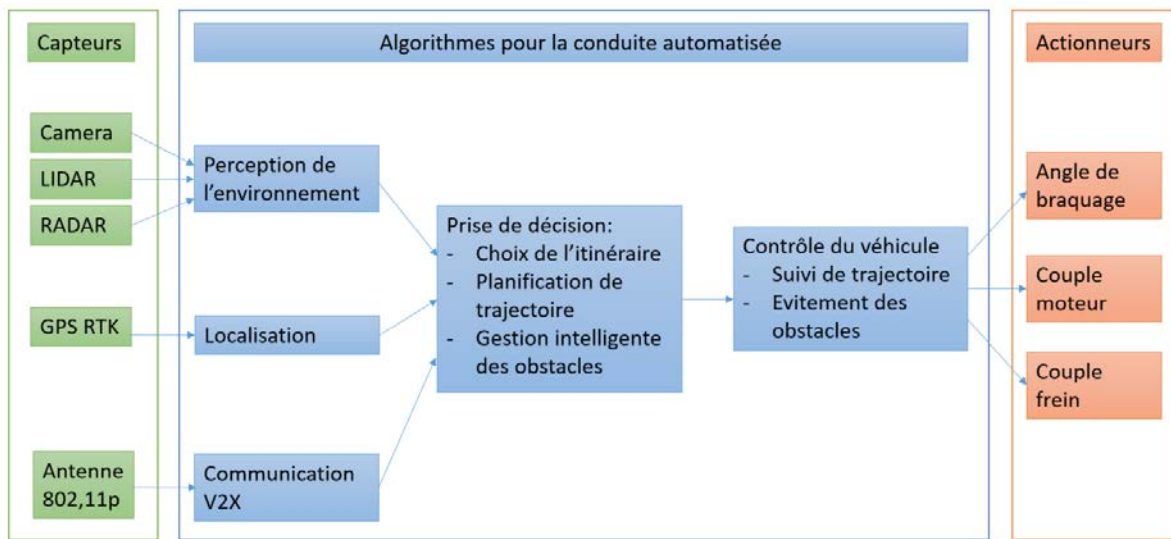


Figure 5: Technologies et algorithmes intégrés au véhicule expérimental VEDECOM

La fusion des données des algorithmes de perceptions, de localisation et de communication V2I permet de construire une carte locale complète qui comprend les différents éléments constituant l'environnement proche du véhicule et l'ensemble des informations nécessaires pour permettre une conduite autonome.

Sur la base de ces informations, le véhicule est capable de prendre l'ensemble des décisions relatives à la conduite automatisée, à savoir :

- Sélectionner un itinéraire en fonction du trafic.
- Planifier à chaque instant une trajectoire permettant de suivre l'itinéraire de façon sécurisée, tout en prenant en compte les éléments de l'infrastructure et les obstacles environnants.
- Anticiper les déplacements des obstacles pour éviter tout risque de future collision.

Enfin, les algorithmes de contrôle envoient des consignes aux actionneurs pour que le véhicule puisse suivre le plus précisément possible la trajectoire planifiée, tout en assurant l'évitement des obstacles ou un freinage d'urgence, en cas de besoin.

L'ensemble de ces algorithmes est implémenté en temps réel sur le PC embarqué du véhicule, à l'aide du logiciel RTMaps.

Dans le cadre du projet SURCA, nous avons décidé de connecter ce PC du VA avec la plateforme de co-simulation SURCA (via RTMaps), afin de pouvoir piloter un VA virtuel avec la version des algorithmes de conduite automatisée utilisée lors de la démonstration ITS de 2017, sans y apporter de modification.

2.4.2. Le modèle de simulation de conducteurs COSMODRIVE de l'Université Eiffel

Le modèle de conducteurs COSMODRIVE est un modèle de simulation numérique développé au LESCOT depuis une vingtaine d'années (Bellet et al, 2003, 2009, 2011, 2019). Ce modèle vise à simuler sur ordinateur les activités mentales d'un conducteur automobile, allant de la perception de la scène routière jusqu'à la mise en œuvre de comportements de conduite, en passant par la modélisation des processus cognitifs comme la prise de décision et la planification de l'action.

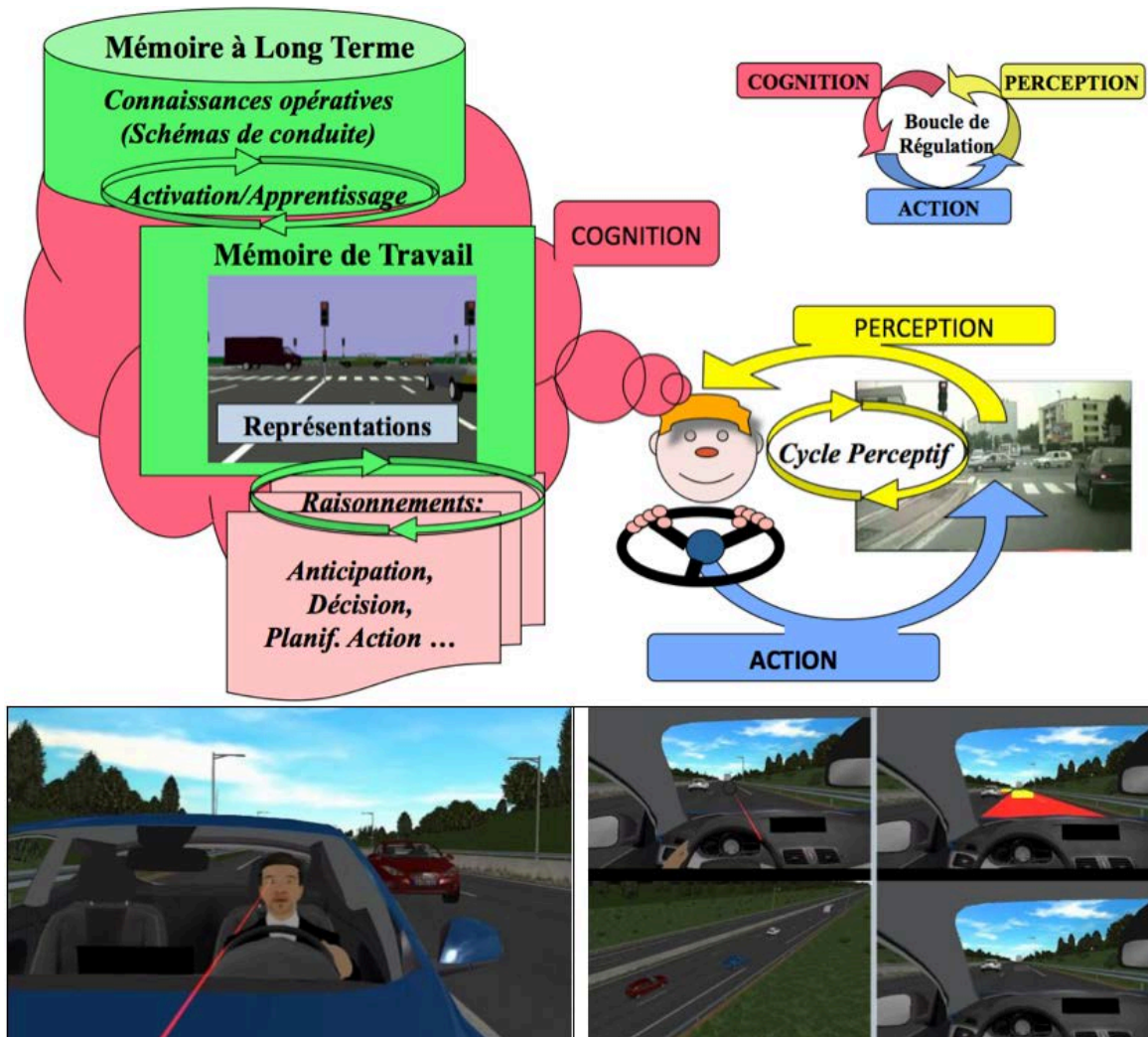


Figure 6: Le modèle de conducteurs COSMODRIVE

Synthétiquement, ce modèle appréhende l'activité de conduite comme un boucle de régulation dynamique « Perception-Cognition-Action » (cf. Figure 6).

Pour gérer ses interactions avec l'environnement, le conducteur humain prélève des informations visuelles dans la scène routière selon un « cycle perceptif » (cf. Neisser, 1976) reposant sur 2 processus complémentaires: un processus dit « top down » de recherche active de l'information (i.e. *exploration visuelle*), et un processus dit « bottom up » d'*intégration cognitive* des informations sensorielles prélevées dans l'environnement.

Au cœur de l'architecture cognitive de ce modèle se situent les *représentations mentales*. Ces représentations, élaborées en mémoire de travail, correspondent à la « *Conscience de la Situation* » du conducteur (cf. Endsley, 1995 ; Bellet et al, 2009), c'est-à-dire au modèle mental de la situation de conduite telle qu'elle a été perçue et comprise par ce même conducteur, à cet instant. C'est sur la base

de ce modèle mental que le conducteur va évaluer les risques situationnels (de collisions avec des obstacles, par exemple), anticiper les effets de ses propres actions, puis prendre ses décisions et planifier ses comportements (i.e. actions sur les commandes du véhicule), afin de gérer ses interactions avec les autres usagers et progresser dans l'environnement routier en toute sécurité. Si cette représentation mentale est erronée, cela pourra déboucher sur de mauvaises décisions et sur l'adoption de comportements de conduite inappropriés, voire dangereux.

Dans le cadre de travaux du LESCOT réalisés antérieurement au projet SURCA, ce modèle a notamment été utilisé (1) pour analyser et modéliser les erreurs humaines en situation de conduite liées à une mauvaise « Conscience de la Situation » (par ex. Bellet et al, 2009), pour (2) évaluer la « Conscience du Risque » en fonction de l'expérience de conduite (notamment chez des motocyclistes novices *versus* expérimentés ; par ex. Bellet et Banet, 2012) pour (3) simuler la prise de décision humaine (Bornard et al, 2016), pour (4) développer des systèmes de monitoring embarqués capables de détecter en temps réel certaines erreurs de conduite des conducteurs âgés et les alerter en cas de prise de risque (cf. Paris et al, 2014), voire pour (5) prendre le contrôle du véhicule, en cas de manœuvres de conduite jugées trop dangereuses (Bellet et al, 2021). Sur la base de ces travaux, il est possible de calibrer COSMODRIVE afin qu'il permette de simuler différents profils de conducteurs en fonction de leur âge (conducteurs jeunes, d'âge moyen, *versus* âgés) et de leur niveau d'expérience de conduite (conducteurs novices *versus* expérimentés). C'est cette version configurable du modèle qui sera intégrée dans la plateforme de co-simulation SURCA (via une sous-traitance auprès d'ESI group afin de l'interfacer avec Pro-SiVIC), afin de reproduire les comportements et les erreurs de conduite de différents profils de conducteurs.

2.4.3. L'outil logiciel Pro-SiVIC (ESI Group)

Le logiciel SiVIC (pour *Simulateur Véhicule-Infrastructure-Capteurs*) est un outil de simulation Véhicule-Environnement-Capteurs initialement développée par l'IFSTTAR-LIVIC (Gruyer, et al., 2006) pour la conception et l'évaluation virtuelle d'aides à la conduite. Depuis 2012, une version industrielle de ce logiciel est commercialisée par la société ESI Group (dénommée Pro-SiVIC). C'est cette version qui a été utilisée dans le projet SURCA.



Figure 7: L'outil Pro-SiVIC (développement de fonctions de perception embarquées)

L'objectif central de cet outil est le prototypage de capteurs virtuels pour les systèmes embarqués. Afin de pouvoir concevoir, développer et évaluer des fonctions de perception, Pro-SiVIC dispose d'un

environnement 3D simulé au moyen du moteur graphique MEngine, permettant de reproduire une situation réelle de conduite d'une façon réaliste du point de vue des capteurs embarqués. Ce logiciel propose également des modules de « capteurs virtuels » permettant de simuler des caméras vidéo, des scanners lasers, une centrale inertielle, un GPS ou des radars. La Figure 7 présente un exemple de fonction de détection de piétons via la fusion de données en provenance de caméras en stéréovision couplées avec le traitement de données en provenance d'un scanner laser.

Dans le projet SURCA, l'objectif sera d'utiliser ces fonctionnalités du logiciel Pro-SiVIC pour la simulation d'un environnement routier et de capteurs embarqués afin de pouvoir alimenter virtuellement (et ainsi de « leurrer ») les véritables algorithmes de décision et de pilotage d'un véhicule autonome de VEDECOM, comme si les informations issues des capteurs virtuels et des fonctions de perception embarquées sur la plateforme SURCA étaient effectivement collectées à bord d'un véritable VA, en situation réelle de conduite.

2.4.4. L'outil logiciel RTMaps (Intempora)

L'outil RTMaps (pour *Real-Time Multisensor Applications*) est un outil logiciel conçu et développé par la société Intempora. Cette plateforme logicielle permet de collecter en temps réel des données multi-sources sur véhicule, d'une façon synchronisée (données issues de caméras, radars, lasers, position GPS, etc). Elle dispose aussi de fonctions logicielles pour le développement et l'exécution d'algorithmes embarqués. Basé sur des composants optimisés pour des applications temps-réel, RTMaps permet ainsi de développer, tester, comparer et valider des applications multi-capteurs pour les systèmes ADAS (Advanced Driving Assistance Systems) ou pour la conduite automatisée.

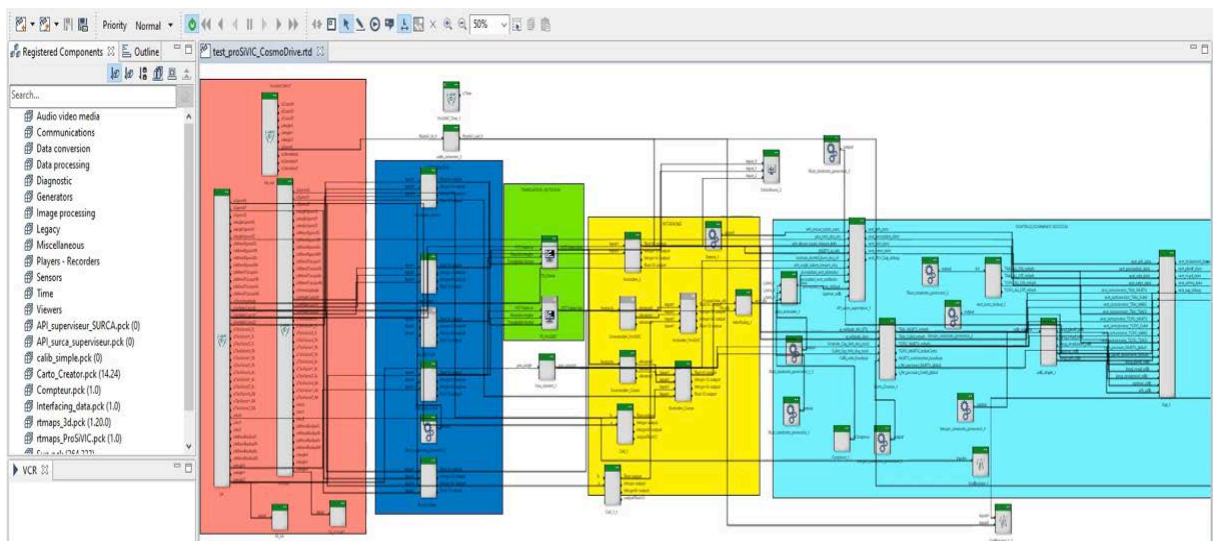


Figure 8 : Exemple d'interface graphique du logiciel RTMaps

C'est ce logiciel qu'utilise VEDECOM pour exécuter ses algorithmes de perception, de décision et de pilotage à bord de ses véhicules autonomes. Dans le cadre du projet SURCA, l'utilisation du logiciel RTMaps permettra ainsi d'interfacer directement les algorithmes d'un véhicule autonome de VEDECOM avec la plateforme de co-simulation SURCA, afin de piloter le VA virtuel de la même façon que s'il s'agissait d'un véritable VA circulant sur une route réelle.

3. Résultats : Développement de la plateforme de co-simulation conçue et développée pour SURCA

A partir des applications logicielles décrites dans la section précédente, les travaux réalisés dans la tâche 4.3 ont permis de connecter ces différents outils de simulation afin de déboucher sur une plateforme de « co-simulation intégrée » pour l'étude des interactions VA-VL.

Les deux prochaines sections présentent (1) l'architecture générale de cette plateforme, telle qu'elle a été conçue et implantée sur machine dans le WP4.3, ainsi (2) que le scénario d'interaction VA-VL implémenté sur cet outil. Ensuite, les deux sections suivantes présenteront successivement (3) les travaux réalisés pour connecter la plateforme SURCA avec les algorithmes du VA de VEDECOM d'un côté, et (4) avec le modèle de conducteurs COSMODRIVE, de l'autre côté.

3. 1. Architecture fonctionnelle de la plateforme de co-simulation

La figure ci-dessous (Figure 9) présente l'architecture fonctionnelle de la plateforme de co-simulation SURCA permettant aux différentes applications logicielles qui la composent d'interagir ensemble, via l'échange de données en temps réel (selon un protocole DDS ou Ethernet).

La plateforme de co-simulation en elle-même est supportée par le logiciel Pro-SiVIC (et son moteur graphique MG Engine) intégrant (1) l'environnement routier en 3D, (2) la simulation du « scénario d'intérêt » retenu en tâche 4.3 afin d'étudier virtuellement les interactions VA-VL, ainsi que (3) les modèles de tous les véhicules à piloter dans ce scénario d'intérêt générique. Pro-SiVIC permet également de simuler les capteurs extéroceptifs du VA et de fournir les données de perception nécessaires aux algorithmes du VA VEDECOM (implémentés pour leur part sur RTMaps) pour prendre ses décisions et planifier ses trajectoires. En retour, les décisions de contrôle/commande sont transmises du PC supportant les algorithmes du VA de VEDECOM (toujours via RTMaps) vers le véhicule Pro-SiVIC en charge de simuler virtuellement ce VA dans la plateforme de co-simulation.

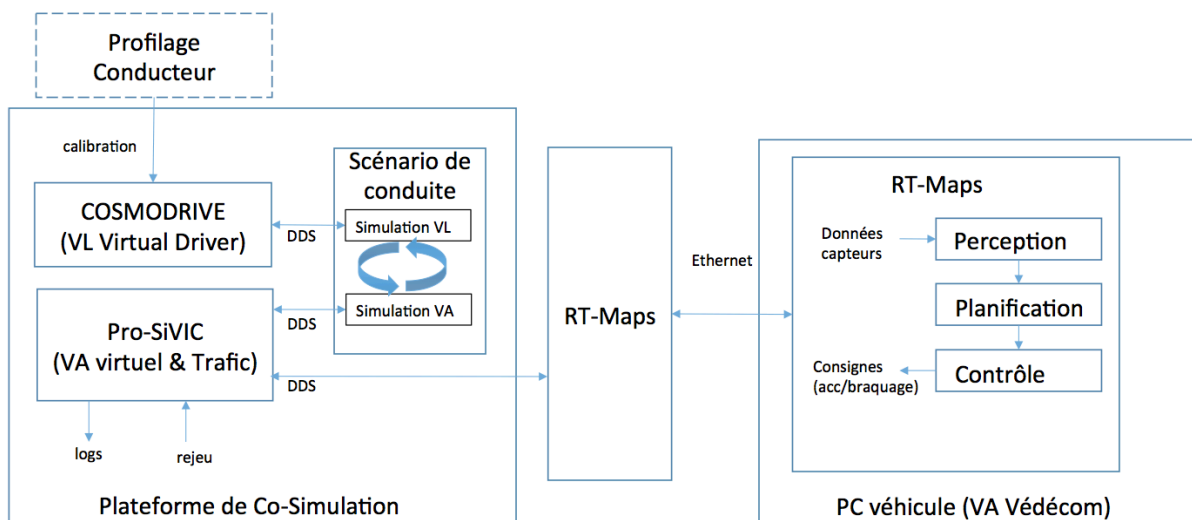


Figure 9 : Architecture fonctionnelle de la plateforme de co-simulation SURCA

Pour ce qui est de la simulation du conducteur de VL avec COSMODRIVE, ce modèle a été directement interfacé avec Pro-SiVIC (via le protocole d'échange de données DDS) afin de recevoir des informations perceptives « en entrée » et de générer « en sortie » les actions à mettre en œuvre sur le véhicule Pro-SiVIC, en charge de simuler virtuellement ce conducteur de VL dans la plateforme de co-simulation.

Pour simuler les comportements et/ou les erreurs de conduite propres à certains groupes de conducteurs (e.g. prises de décision de rabattement plus ou moins agressives, voire dangereuses, capacités de perception plus ou moins amoindries, capacités de contrôle du véhicule plus ou moins bien maîtrisées), le modèle est couplé avec un module de « profilage » permettant de sélectionner une instance de COSMODRIVE spécifiquement calibrée, en fonction du profil de conducteur que l'on souhaite simuler et faire interagir avec le VA (e.g. conducteurs ayant un style de conduite agressif, conducteurs âgés ou novices inexpérimentés).

Au final, les véhicules simulés dans la plateforme de co-simulation SURCA peuvent ainsi être pilotés dans l'environnement 3D de Pro-SiVIC selon 4 modes différents:

- **Un mode « manuel »** : en intégrant des dispositifs de pilotage, comme un volant et des pédales, connectés à la plateforme (possibilité d'utiliser aussi un joystick ou le clavier) afin de piloter le véhicule virtuel. Ce mode n'est pas utilisé pour les démonstrations SURCA présentées dans ce livrable, mais cette fonctionnalité a été utilisée au cours du processus de développement de la plateforme pour concevoir et tester certaines fonctionnalités de cet outil ainsi que certaines variantes de scénarios.
- **Un mode « virtual driver »** : reposant sur les fonctionnalités natives des véhicules virtuels de Pro-SiVIC enrichies d'une fonction de maintien des distances inter-véhiculaires développée au LESCOT, permettant au VL de suivre automatiquement une trajectoire définie à l'avance (comme suivre le centre de la voie en adoptant une vitesse de croisière continue). C'est selon ce mode que sont pilotés les 3 véhicules tiers du scénario d'intérêt (i.e. les 2 véhicules VL noirs, situés respectivement devant le VA et derrière COSMODRIVE, dans la Figure 2, ainsi que le véhicule blanc situé derrière le VA).
- **Un mode « Véhicule Autonome »** : pour lequel le véhicule est piloté par une application tierce. Dans notre cas, il s'agira des algorithmes du VA de VEDECOM implémentés sur RTMaps (sur un autre PC connecté à la plateforme). En entrée, ces algorithmes reçoivent les données de perception issues des capteurs virtuels de Pro-SiVIC, et en sortie, ils pilotent en retour le VA virtuel dans Pro-SiVIC en fonction de décisions prises, en générant des consignes de pilotage (braquage, couple moteur, et couple frein) permettant de piloter le VA virtuel dans la plateforme SURCA.
- **Un mode « COSMODRIVE »** : permettant de simuler au moyen d'un véhicule Pro-SiVIC les perceptions, les décisions, les comportements, les erreurs et les styles de conduite de différents profils de conducteurs humains.

3.2. Développements réalisés pour la simulation du scénario d'interactions VA-VL

Le scénario d'interactions VA-VL développée pour SURCA, discuté en section 2.2 et présenté initialement en Figure 2, a été implémenté dans l'environnement 3D Pro-SiVIC (utilisant le moteur graphique MG Engine). La Figure 10 montre une visualisation de cette scène routière, en vue céleste. En début de scénario, tous les véhicules sont arrêtés. En appuyant sur une commande centralisée, tous les véhicules démarrent en même temps et accélèrent afin d'atteindre une vitesse de croisière similaire de 90 km/h. Après une vingtaine de secondes, toutes les variantes du scénario (qui seront présentées ultérieurement) débouchent sur la même situation de conduite « standardisée », correspondant à l'état du monde représenté en Figure 10.



Figure 10 : Simulation du scénario d'interaction VA-VL sur la plateforme de co-simulation SURCA

A partir de cet instant :

- Le premier véhicule (noir), simulant un VL tiers, roule à vitesse constante (90 km/h) sur la voie de droite. Il est piloté en mode « virtual driver » et il se contente ici de suivre le centre de sa voie tout en maintenant sa vitesse de croisière.
- Le véhicule rouge, simulant le VA, est piloté via le logiciel RTMaps, et régule son allure selon les algorithmes du véritable VA de VEDECOM.
- Le véhicule jaune est piloté par le modèle de conducteurs COSMODRIVE. En fonction de sa calibration, le modèle accélérera pour dépasser le VA VEDECOM puis se rabattra devant ce dernier selon différentes manœuvres (plus ou moins agressives et proches du VA).
- Les véhicules tiers blanc et bleu suivent le centre de leurs voies respectives, en adaptant leur allure aux véhicules qui les précèdent (pilotage en mode « virtual driver »).

Une fois la situation de trafic standardisée atteinte, le VL piloté par COSMODRIVE va accélérer pour dépasser le VA VEDECOM puis se rabattre devant lui. La Figure 11 montre les quatre étapes de cette situation d'interaction, telle qu'elle peut être vécue à bord du véhicule « VA VEDECOM » virtuel:

- 1) **Phase 1** : dépassement du VL COSMODRIVE avec indication de son intention de se rabattre devant le VA, via l'activation du clignotant droit,
- 2) **Phase 2** : moment où COSMODRIVE pénètre dans la voie de circulation du VA (appelant, le cas échéant, une réaction du VA pour garantir la sécurité de l'interaction),

- 3) **Phase 3** : fin de la manœuvre de rabattement du conducteur de VL COSMODRIVE,
- 4) **Phase 4** : suivi de ce VL à bord du VA, lorsque ce dernier a adapté sa vitesse de croisière et sa distance de sécurité au comportement de conduite simulé par COSMODRIVE.

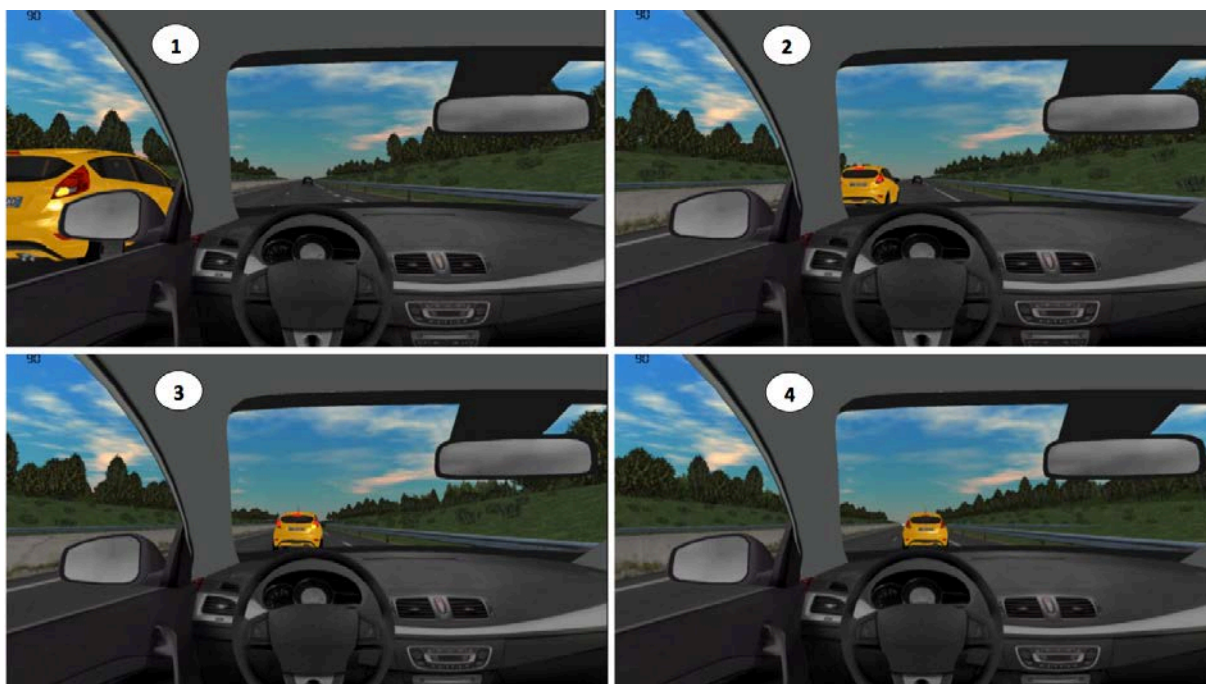


Figure 11 : les 4 étapes de la situation de rabattement de COSMODRIVE, vécues à bord du véhicule autonome

3.3. Développements réalisés pour la simulation du VA de VEDECOM

L'objectif pour VEDECOM était d'intégrer un modèle de véhicule à conduite automatisée dans la plateforme de co-simulation SURCA. Afin d'avoir un modèle de véhicule autonome réaliste, il a été décidé d'interfacer la plateforme avec les algorithmes de prise de décision et de contrôle tels qu'ils ont été mis en œuvre sur le VA de VEDECOM lors de la démonstration de conduite autonome de niveau 5 réalisée lors du Congrès ITS 2017 à Strasbourg.

Cette interface permet de faire interagir les capteurs virtuels et les actionneurs du modèle de véhicule de Pro-SiVIC d'un côté, avec les algorithmes de perception, de prise de décision et de contrôle du VA VEDECOM embarqués sur RTMaps, de l'autre côté.

L'interfaçage entre Pro-SiVIC et RTMaps a pour but d'alimenter les algorithmes de perception du véritable VA à l'aide des données issues des capteurs virtuels disponibles dans Pro-SiVIC, afin de fournir aux algorithmes de prise de décision du VA l'ensemble des informations nécessaires au calcul et à la planification de sa trajectoire, ainsi qu'à la gestion des obstacles (Figure 12).

Pour le scénario d'interaction retenu pour la simulation numérique, cela nécessite d'extraire de l'environnement routier Pro-SiVIC la position des marquages au sol par rapport au VA, ainsi que la position et la vitesse relative des différents obstacles mobiles (i.e. les autres véhicules de la scène). Il a ensuite fallu concevoir des composants logiciels pour convertir ces données perceptives dans le même format que les algorithmes de perception du VA de VEDECOM. Grâce à cette approche, il est possible d'alimenter les algorithmes de prise de décision du VA sans avoir à les modifier par rapport à la version mise en œuvre lors de la démonstration sur route lors du Congrès ITS de 2017 (cf. section 2.4.1). En fonction des trajectoires planifiées et de la position des obstacles, les algorithmes de contrôle fournissent les consignes à transmettre aux actionneurs du VA virtuel de la plateforme de co-

simulation (à l'image de ce qui serait envoyé aux commandes réelles pour le véritable VA VEDECOM) : angle de braquage, couple moteur et couple frein. Une fois ces consignes reçues, le modèle dynamique du VA dans Pro-SiVIC exécute la trajectoire planifiée dans l'environnement routier de la plateforme SURCA.

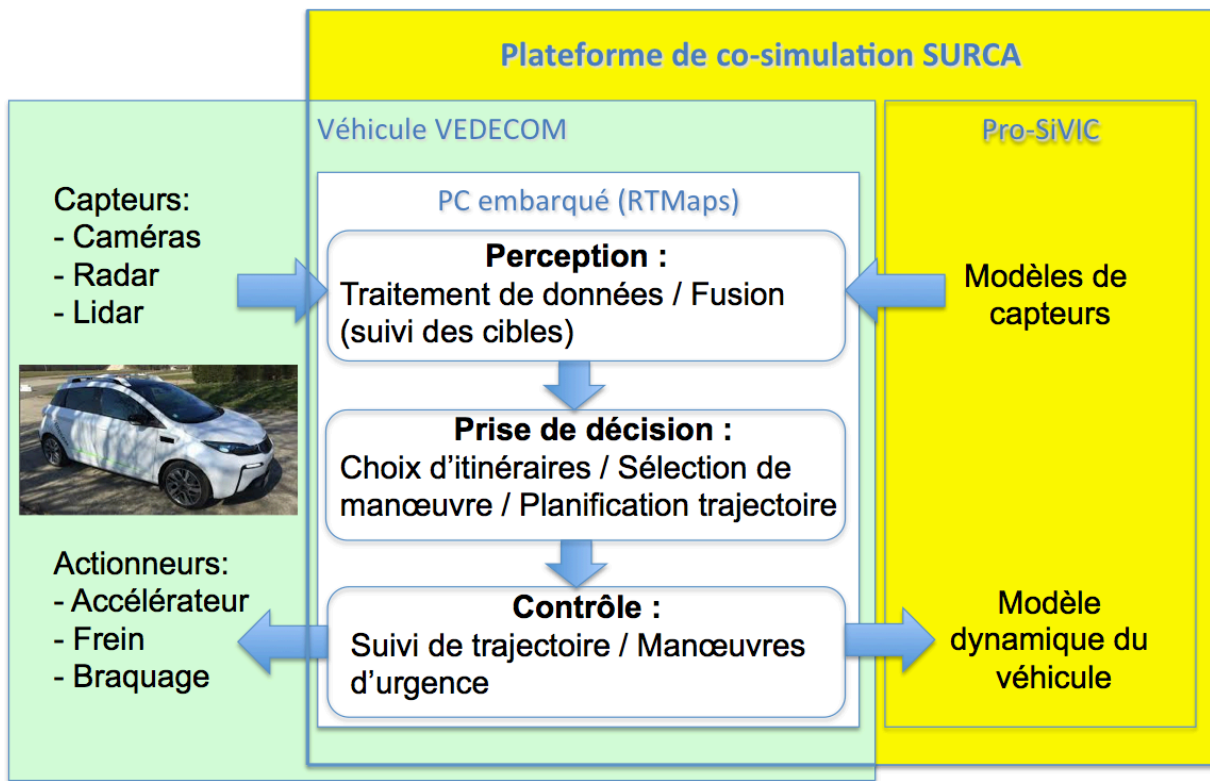


Figure 12 : Interfaçage des algorithmes du VA de VEDECOM avec Pro-SiVIC, via RTMaps, pour la simulation du VA dans la plateforme de co-simulation SURCA

La figure ci-dessous (Figure 13) présente l'interface entre les logiciels Pro-SiVIC et RTMaps. Sur le plan technique, les algorithmes du véhicule autonome de VEDECOM sont embarqués sur un PC identique au PC des Renault Zoé. Une instance de RTMaps implantée sur le PC de la plateforme de co-simulation SURCA permet l'échange de données entre les deux PC, en temps réel, via une liaison Ethernet. Cela permet de fournir en continu aux algorithmes de perception du VA les données issues des capteurs virtuels Pro-SiVIC et, inversement, à l'algorithme de contrôle de piloter les actionneurs du VA virtuel dans la plateforme (comme s'il pilotait un véritable VA sur la route).

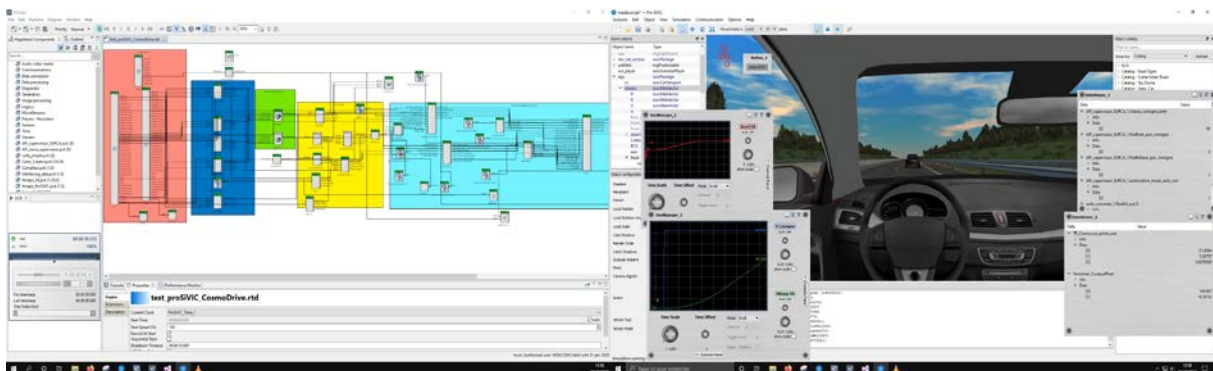


Figure 13 : Interfaçage des logiciels RTMaps et Pro-SiVIC pour piloter le VA dans la plateforme de co-simulation SURCA

3.4. Développements réalisés pour la simulation de différents profils de conducteurs de VL au moyen du modèle COSMODRIVE

Pour ce qui est de COSMODRIVE, ce modèle a directement été connecté avec un véhicule virtuel de Pro-SiVIC (partenariat avec ESI group, via une sous-traitance SURCA), afin de disposer d'un conducteur virtuel de VL capable de planifier ses trajectoires et de changer de voies en mimant les comportements de véritables conducteurs humains.

Synthétiquement (Figure 14), COSMODRIVE perçoit l'environnement routier au moyen d'un œil virtuel adapté du modèle de caméra disponible sous Pro-SiVIC, puis il prend des décisions en fonction de sa représentation « mentale » de la situation (i.e. sa « conscience de la situation de conduite » en fonction de ce qu'il en a perçu et compris), puis il met en œuvre les comportements de conduite en agissant directement sur les commandes du VL virtuel de Pro-SiVIC qu'il est en charge de conduire.

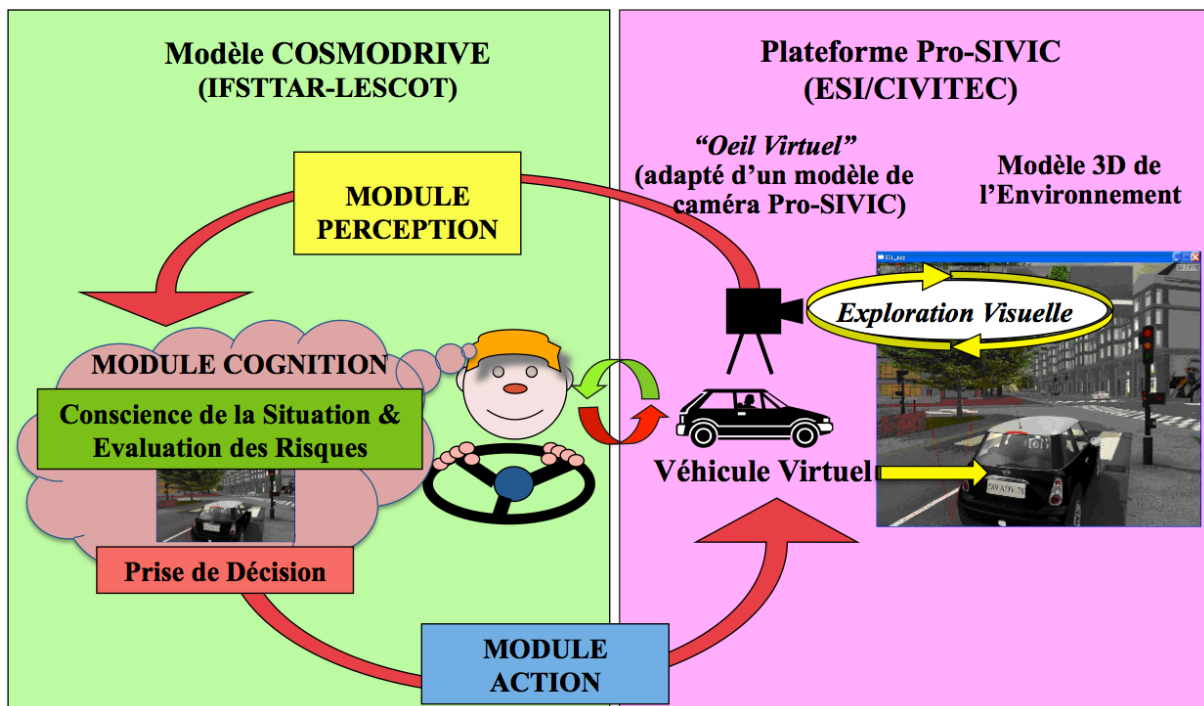


Figure 14 : Interfaçage du modèle COSMODRIVE et de Pro-SiVIC pour piloter le VL dans la plateforme de Co-Simulation

Par ailleurs, différentes instances de COSMODRIVE ont été définies, afin de pouvoir simuler certains comportements et/ou erreurs de conduite lors d'un changement de voie (cf. section 2.4.2), en fonction de trois profils (ou « *Persona* ») de conducteurs humains très contrastés :

- 1) **Un profil de conducteurs expérimentés d'âge moyen**, ayant un style de conduite plus ou moins « agressif » (i.e. queues de poisson plus ou moins critiques, en se rabattant devant le VA d'une façon plus ou moins proche et brutale).
- 2) **Un profil de conducteurs âgés**, susceptibles de rencontrer des difficultés dans la perception des vitesses et dans l'estimation des distances de sécurité via leurs rétroviseurs lors de la réalisation du rabattement devant le VA.
- 3) **Un profil de conducteurs novices**, susceptibles de rencontrer des difficultés dans la maîtrise de leur véhicule lors de la réalisation de la manœuvre de rabattement (i.e. coup de volant trop énergique pour changer de voie, suivi d'une perte de contrôle plus ou moins conséquente).

Appliqués aux situations d'interactions VA-VL, ces trois profils « stéréotypés » de COSMODRIVE ont été utilisés pour générer 10 variantes du scénario d'intérêt SURCA, chaque instance représentant un défi à relever plus ou moins difficile pour le VA de VEDECOM.

Ainsi, la Figure 15 présente les 3 variantes de « queues de poissons » susceptibles d'être réalisées par un conducteur « expérimenté et agressif » simulé avec le modèle COSMODRIVE (de la moins critique pour l'image du haut à la plus dangereuse pour l'image du bas).



Figure 15 : Trois variantes de la manœuvre de « queue de poisson » simulée avec COSMODRIVE

Ces 3 vues sont des captures d'écrans de la scène routière lorsque le VL piloté par COSMODRIVE s'insère dans la voie de circulation du VA. Elles correspondent au point de vue de l'occupant de ce VA lorsqu'il est installé sur le siège conducteur.

Dans la première scène, le VL se rabat à 9 mètres devant le VA (conduite « peu agressive »), dans la seconde il se rabat à 6 mètres devant le VA (conduite « moyennement agressive ») et dans dernière, il se rabat à 3 mètres seulement devant le VA (conduite « très agressive », voire malveillante, débouchant sur une queue de poisson particulièrement dangereuse).

Toutefois, en dépit des risques liés à ces 3 manœuvres, la vitesse du VL demeure ici supérieure à celle du VA à l'issue du dépassement (passage progressif de 100 km/h, lors du dépassement, à 90 km/h quelques secondes après l'insertion). Il n'y a donc pas de réel risque de collision avec le VA, mais celui-ci peut néanmoins être amené à réagir pour rétablir au plus vite une bonne distance de sécurité avec le VL piloté par COSMODRIVE lorsque celui-ci s'insère dans sa voie.

En complément des 3 instances précédentes, une 4^{ème} variante de ce scénario de changement de voie « agressif » a été développée afin de simuler un accrochage entre COSMODRIVE et le véhicule précédant le VA (i.e. avec lequel le VA régulait sans distance de sécurité avant l'intrusion de COSMODRIVE). La Figure 16 montre la scène routière au moment où l'accrochage se produit. Même si les 2 VL continuent d'avancer sur leurs trajectoires après l'accrochage, cette situation nécessite néanmoins une réaction du VA (freinage) pour éviter la collision.



Figure 16 : Simulation d'un accident du VL piloté par COSMODRIVE avec le véhicule précédant le VA VEDECOM

Dans un registre totalement différent, une autre variante du scénario d'intérêt reposant sur une calibration spécifique de COSMODRIVE a été développée en se basant sur des travaux antérieurs du LESCOT consacrés à l'analyse des erreurs de conduite des conducteurs âgés de 70 ans et plus (Paris et al, 2014 ; Bellet et al, 2021).

La Figure 17 ci-dessous présente un exemple typique de certaines difficultés rencontrées au volant par les séniors en situation de rabattement sur voie rapide. Dans cette situation particulière, le conducteur (un homme âgé de 76 ans) doit se rabattre sur la voie de droite pour rejoindre une bifurcation sur la périphérique, afin de suivre sa destination. Pour effectuer cette manœuvre, il jette plusieurs coups d'œil dans son rétroviseur droit avant de changer de voie, attestant qu'il a bien pris en compte et détecté la présence d'une voiture venant de derrière et circulant sur sa voie de destination (cf. la voiture blanche, visible sur la « vue arrière » de la figure, se déplaçant à une vitesse sensiblement égale à celle de notre conducteur). Cependant, n'ayant pas estimé correctement la distance le séparant de ce véhicule au moyen de son rétroviseur, il engage sa manœuvre de rabattement (activation des clignotants droits) et pénètre dans la voie latérale à 3 mètres seulement devant le véhicule en approche. Pour éviter la collision, celui-ci est alors contraint de freiner, tout en klaxonnant, et en se déportant dans la bande d'arrêt d'urgence.



Figure 17 : Exemple réel d'erreur typique d'un conducteur âgé ayant des difficultés pour apprécier les distances en situation de rabattement (extrait de Bellet et al, 2021)

Il s'agit là de l'une des difficultés typiques rencontrées par certains conducteurs âgés lors des manœuvres de rabattement sur voies rapides : évaluer correctement les distances de sécurité et/ou les vitesses d'approche des autres véhicules via les rétroviseurs, afin de prendre la bonne décision et de se rabattre à une distance de sécurité suffisante. Par trafic dense, il arrive aussi que certains conducteurs âgés freinent en fin de manœuvre de rabattement pour retrouver une vitesse de croisière plus confortable, ce qui augmente encore le risque de collision arrière.

Afin de rendre compte de cette erreur de conduite typique des séniors, trois instances de changement de voie de COSMODRIVE ont été définies, débouchant sur des rabattements plus ou moins proches du véhicule VA. A l'image des « queues de poissons » décrites précédemment, les distances longitudinales de rabattement sont respectivement de 9 mètres (pour la moins critique), de 6 mètres, et de 3 mètres (pour la plus critique). Mais à la différence des simulations de « conduite agressives », les rabattements sont effectués ici avec un différentiel de vitesse avec le VA inférieur (95 km/h ici, contre 100 pour les queues de poisson). En outre, une fois inséré dans sa voie de destination, le VL piloté par COSMODRIVE freine pour réduire temporairement sa vitesse à 85 km/h (avant de ré-accélérer à 90 km/h), augmentant alors considérablement le risque de collision pour le VA (évoluant pour sa part à 90 km/h avant l'insertion de COSMODRIVE). C'est notamment le cas pour le changement de voie à une distance de rabattement de 3 mètres, variante du scénario pour laquelle l'accident est inévitable en cas d'absence de réaction appropriée du VA. La Figure 18 ci-dessous présente cette variante la plus critique pour ce scénario. La première image correspond au début de la manœuvre de rabattement, lorsque le VL piloté par COSMODRIVE s'insère dans la voie de circulation du VA à 3 mètres de distance. La seconde vue correspond au moment où le VL COSMODRIVE commence à freiner, en fin de rabattement. La

dernière image correspond à la situation d'accident qui se produira si le VA ne réagit pas pour réduire son allure et éviter la collision.



Figure 18 : Simulation d'une erreur de conduite typique des conducteurs âgés, lorsque ceux-ci ont des difficultés pour apprécier les distances des autres véhicules via leurs rétroviseurs, en situation de rattrapage sur voie rapide

Une dernière série de situations d'interactions VA-VL critiques a été implémentée sur la plateforme SURCA. Dans ces variantes du scénario, COSMODRIVE a été calibré pour simuler une erreur de conduite plus typique des conducteurs novices¹ renvoyant à un défaut de maîtrise d'une manœuvre de rabattement réalisée à une vitesse excessive, débouchant sur une perte de contrôle du véhicule.



¹ <https://www.securite-routiere.gouv.fr/chacun-sa-conduite/conseils-aux-conducteurs-novices>

Figure 19 : Exemple de perte de contrôle par un conducteur novice lors d'un rabattement sur voie rapide, engagé de façon mal maîtrisée (coup de volant un peu trop brutal) en raison d'une vitesse excessive

Dans les 3 instances de ce scénario, dont le cas le plus critique est présenté en Figure 19, le VL piloté par COSMODRIVE dépasse tout d'abord le VA à une vitesse relativement élevée de 100 km/heure, puis il engage sa manœuvre de rabattement d'une façon un peu trop brusque (1^{ère} image de la figure), ce qui entraîne une perte de contrôle plus ou moins marquée de son véhicule et le déport du VL dans la bande d'arrêt d'urgence (2^{ème} image). Pour éviter une collision avec la barrière de sécurité, le conducteur novice simulé par COSMODRIVE donne alors un coup de volant plus ou moins conséquent (3^{ème} image) qui permet de ramener le VL dans sa voie de circulation (4^{ème} image), mais en faisant tanguer son véhicule sur plusieurs mètres avant de pouvoir reprendre totalement le contrôle de la situation.

Dans la version la moins critique de ce scénario, la brutalité de la manœuvre initiale est plus modérée, le déport latéral du véhicule dans la bande d'arrêt d'urgence est plus limité, et le coup de volant nécessaire pour récupérer la trajectoire est de plus faible amplitude. Il en résulte un tangage de plus courte durée et une récupération de la trajectoire du VL par COSMODRIVE au moyen d'une accélération, qui permet d'éviter une collision fronto-arrière.

A l'inverse, pour la manœuvre de rabattement la plus critique présentée en Figure 19, toutes les manœuvres de COSMODRIVE sont plus brutales, si bien que le modèle ne parvient au final à récupérer sa trajectoire qu'en freinant, ce qui débouchera inévitablement sur une collision fronto-arrière avec le VA, du moins si celui-ci ne réagit pas d'une façon appropriée (5^{ème} image).

4. Démonstration de faisabilité : 3 exemples de co-simulation des interactions VA-VL au moyen de la plateforme SURCA

Cette dernière section sera consacrée à la validation de l'objectif initial que nous nous étions fixés dans la tâche 4.3 (cf. 1.3), à savoir démontrer la faisabilité et l'intérêt (i.e. *proof of concept*) d'une plateforme de co-simulation numérique pour l'étude prospective et l'évaluation virtuelle des capacités d'un VA à gérer de manière sécuritaire ses interactions avec les autres conducteurs humains, y compris lorsque ceux-ci adoptent des comportements dangereux. A cette fin, des simulations confrontant le VA virtuel piloté par les algorithmes du véritable VA de VEDECOM (en remplacement du VA « sans capacité de réaction » utilisé dans la section 3.4 pour calibrer les comportements dangereux de COSMODRIVE) avec les 10 instances de ce modèle (4 profils de conducteurs expérimentés plus ou moins agressifs, 3 profils de conducteurs âgés et 3 profils conducteurs novices) ont été réalisées sur la plateforme de co-simulation SURCA.

Le premier résultat général qu'il convient de souligner ici est qu'aucune de ces 10 variantes des situations d'interactions VA-VL décrites dans la section précédente n'a donné lieu à un accident entre le VA de VEDECOM et les différents profils de conducteurs simulés avec COSMODRIVE, y compris pour les 3 instances d'interactions les plus critiques pour lesquelles le comportement particulièrement dangereux de COSMODRIVE était susceptible d'occasionner un accident en l'absence de réaction appropriée de la part du VA.

Avant de présenter les démonstrations des simulations portant sur ces 3 scénarios les plus critiques, la Figure 20 ci-dessous présente (au moyen de l'interface de RT-Maps) le comportement du VA sur la plateforme durant des 20 premières secondes communes à tous les scénarios. Durant cette période, l'ensemble des véhicules démarrent puis accélèrent pour atteindre une vitesse de croisière de 90 km/h et se retrouvent dans la situation de conduite « standardisée » correspondant à l'état du monde représenté en Figure 10 (discutée en section 3.5.2), avant le rabattement de COSMODRIVE (qui va s'engager à cet instant pour toutes les variantes du scénario). La courbe 1 montre l'augmentation progressive de la vitesse du VA lors de la phase initiale (pendant 12 secondes), suivie par un plateau lorsque les 90 km/h sont atteints, et la courbe 2 permet de visualiser l'accélération du VA, forte et continue dans un premier temps, puis plus modérée une fois la vitesse de croisière atteinte, afin de réguler son allure et de maintenir une distance de suivi sécuritaire avec le véhicule qui le précède dans notre scénario d'intérêt.



Figure 20 : Visualisation sur RTMaps de la vitesse et de l'accélération du VA VEDECOM pendant les 20 premières secondes des scénarios d'interactions VA-VL

Ce n'est qu'une fois parvenu à ce stade de la simulation que les 10 variantes du scénario d'intérêt pourront être déclinées, via l'adoption de comportements alternatifs de dépassement puis de rabattement plus ou moins critiques par le modèle COSMODRIVE (calibré selon les différents profils de conducteurs sélectionnés pour chaque simulation).

Dans les sections suivantes, nous allons examiner successivement le résultat des simulations au-delà de ces 20 premières secondes du scénario, en nous focalisant sur les 3 situations les plus critiques nécessitant une réaction de la part du VA pour éviter l'accident, à savoir (1) lors de l'accrochage de COSMODRIVE avec le véhicule précédant le VA (cf. cas présenté en Figure 16), (2) lors du rabattement du VL à 3 mètres devant le VA (suivi d'un freinage modéré) réalisé par un conducteur âgé ayant des difficultés à estimer les distances de sécurité pour réaliser son changement de voie (cf. situation décrite en Figure 18) et (3) lors de la perte de contrôle de son véhicule par un conducteur novice, suivie au bout de quelques secondes d'un freinage appuyé sur la voie du VA, afin de récupérer sa trajectoire (cf. manœuvre présentée en Figure 19).

4.1. Gestion d'une situation d'accident se produisant devant le VA

La Figure 22 permet de visualiser la réaction du VA VEDECOM lorsqu'il est confronté à l'accrochage de COSMODRIVE avec le VL noir précédant le VA. La courbe 1 permet de visualiser, via l'interface de RTMaps, la décélération du VA suite au freinage engagé par les algorithmes du VA de VEDECOM, suivie d'une stabilisation permettant de maintenir une distance sécuritaire avec les véhicules accidentés, toujours en mouvement après l'accrochage (et progressant à vitesse de 85 km/h environ). La courbe 2 permet, quant à elle, de visualiser les effets du freinage sur la vitesse du VA, avant de commencer elle aussi à se stabiliser à 85 km/h environ.



Figure 21 : Réaction du VA VEDECOM (freinage) lors de la survenue d'un accident de COSMODRIVE

En réagissant ainsi, le VA a donc parfaitement réussi à gérer la situation critique, et à rétablir une situation de conduite sécuritaire au bout de 3 secondes environ. Toutefois, dans cette variante du scénario d'intérêt, la situation critique est relativement facile à gérer dans la mesure où la collision de COSMODRIVE a lieu à une certaine distance du VA, lui laissant ainsi le temps de réagir, mais aussi et surtout parce que les 2 véhicules accidentés continuent leur déplacement à une vitesse de 85 km/h après l'accrochage. Les choses sont en revanche bien différentes pour nos 2 autres scénarios critiques, dans le cadre desquels une réaction bien plus significative du VA sera attendue pour éviter la collision avec COSMODRIVE.

4.2. Gestion d'une erreur de conduite typique d'un conducteur âgé

La Figure 22 correspond au déroulé de l'erreur de conduite d'un conducteur âgé présentée et discutée en Figure 18, selon trois états successifs de la situation lorsque COSMODRIVE s'insère devant le VA. La colonne de gauche montre l'évolution de cette situation dans le cas d'un VA sans capacité de réaction (cf. version hypothétique utilisée en section 3 pour calibrer le modèle), tandis que la colonne de droite montre l'évolution de cette même situation telle qu'elle a été effectivement gérée par les algorithmes du VA de VEDECOM (temps synchronisés entre les 2 images présentées côte-à-côte, correspondant au même instant situationnel).

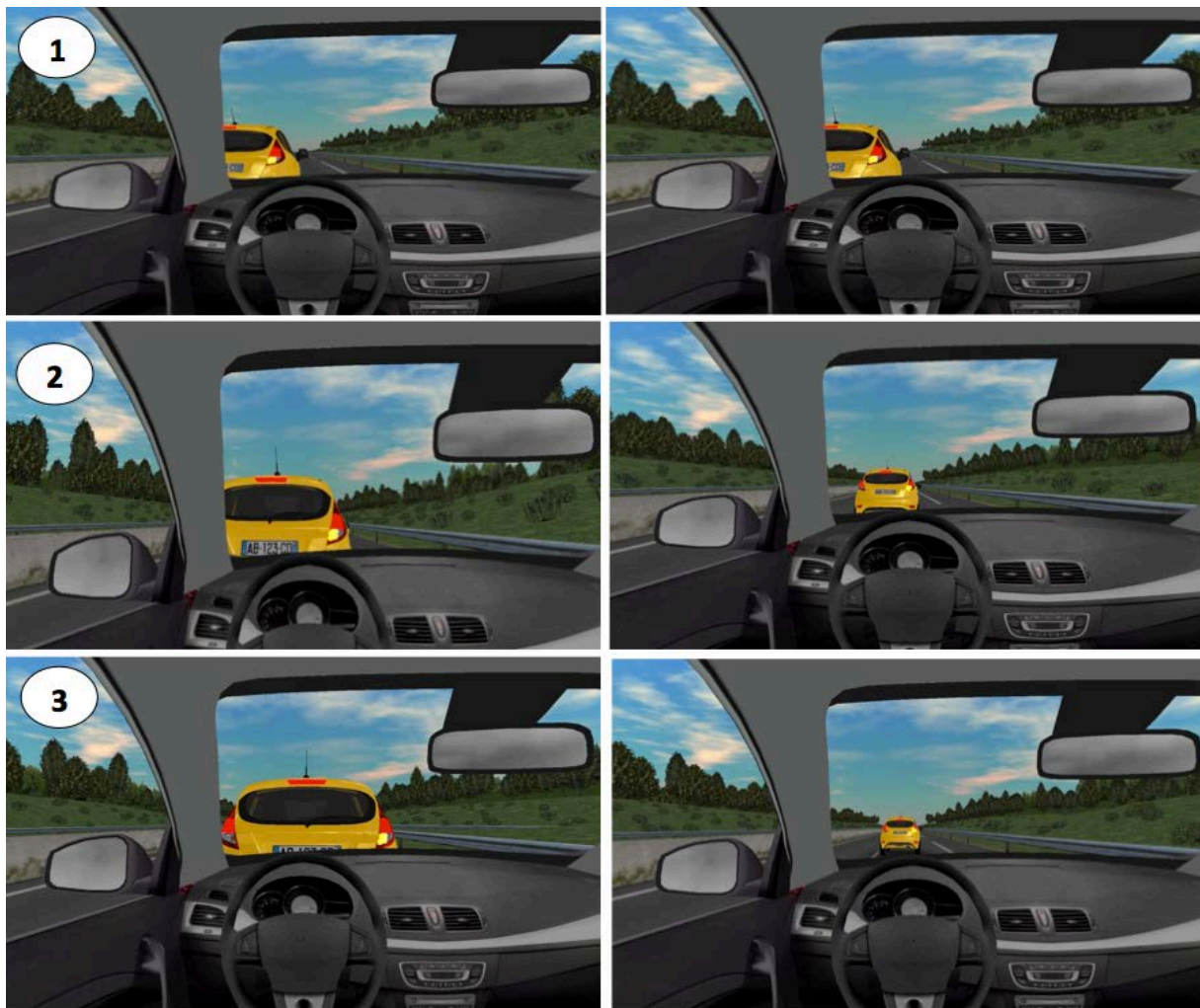


Figure 22 : Gestion d'un rabattement dangereux (erreur typique d'un conducteur âgé) par le VA de VEDECOM

Dans cette situation de rabattement dangereux (à 3 mètres devant le VA) suivi par un freinage modéré de COSMODRIVE, l'accident se produit inévitablement en moins de 4 secondes après le début du rabattement engagé par COSMODRIVE, du moins si le VA ne réagit pas face à ces événements (cf. image correspondant à la phase 3 de la colonne de gauche).

A contrario, l'examen de la colonne de droite permet de visualiser la façon dont le VA virtuel piloté par les algorithmes de VEDECOM réagit. Dès la pénétration de COSMODRIVE dans sa voie de circulation (étape 1), celui-ci engage une décélération marquée dont les effets sont déjà nettement visibles en phase 2 (2 secondes plus tard environ) : la collision est partiellement gérée par le VA VEDECOM à cet instant (image de droite), alors qu'elle devient imminente pour le VA sans capacité de réaction (image de gauche). Au bout de 4 secondes (phase 3), le VA VEDECOM a rétabli une distance de sécurité appropriée (image de droite), alors que le VA sans capacité de réaction entre pour sa part en collision avec COSMODRIVE (vue de gauche).

4.3. Gestion d'une erreur de conduite typique d'un conducteur novice

La Figure 23 correspond au déroulé de l'erreur de conduite d'un conducteur novice, préalablement présentée et discutée en Figure 19 (i.e. engendrant inévitablement une collision fronto-arrière avec un VA, si celui-ci ne réagit pas), réduite ici à trois états successifs une fois que COSMODRIVE s'insère devant le VA.

La colonne de gauche montre l'évolution de cette situation dans le cas d'un VA sans capacité de réaction (i.e. conformément à ce qui s'est produit en figure 19), tandis que la colonne de droite montre l'évolution de cette même situation telle qu'elle a été effectivement gérée par les algorithmes du VA de VEDECOM (temps synchronisés entre les 2 images présentées côte-à-côte).

Dans cette situation de perte de contrôle d'un conducteur novice, comme conséquence d'une manipulation un peu trop brutale du volant pour engager le rabattement (suivi d'un tangage du véhicule pendant 4 secondes environ, puis d'un freinage appuyé de COSMODRIVE pour récupérer la trajectoire de son véhicule), l'accident se produit inévitablement au bout de 7 secondes si jamais le VA ne réagit pas correctement face aux événements (cf. image correspondant phase 3 de la colonne de gauche).

A l'inverse, l'examen de la colonne de droite permet de visualiser la façon dont le VA virtuel de VEDECOM s'est comporté pour gérer cette situation. Dès l'intrusion de COSMODRIVE dans sa voie de circulation (étape 1), la VA décélère de sorte à rétablir en 4 secondes (cf. images de l'étape 2) une distance de sécurité plus acceptable (image de droite), alors qu'au même moment le risque de collision n'est absolument pas géré par le VA sans capacité de réaction (image de gauche).

Enfin, après 7 secondes (images de la phase 3), le VA VEDECOM parvient de son côté à rétablir une distance de sécurité appropriée, malgré le freinage appuyé engagé par COSMODRIVE pour récupérer son véhicule (image de droite), alors que le VA sans capacité de réaction entre pour sa part, à ce même instant, en collision frontale avec le conducteur novice virtuel (vue de gauche).

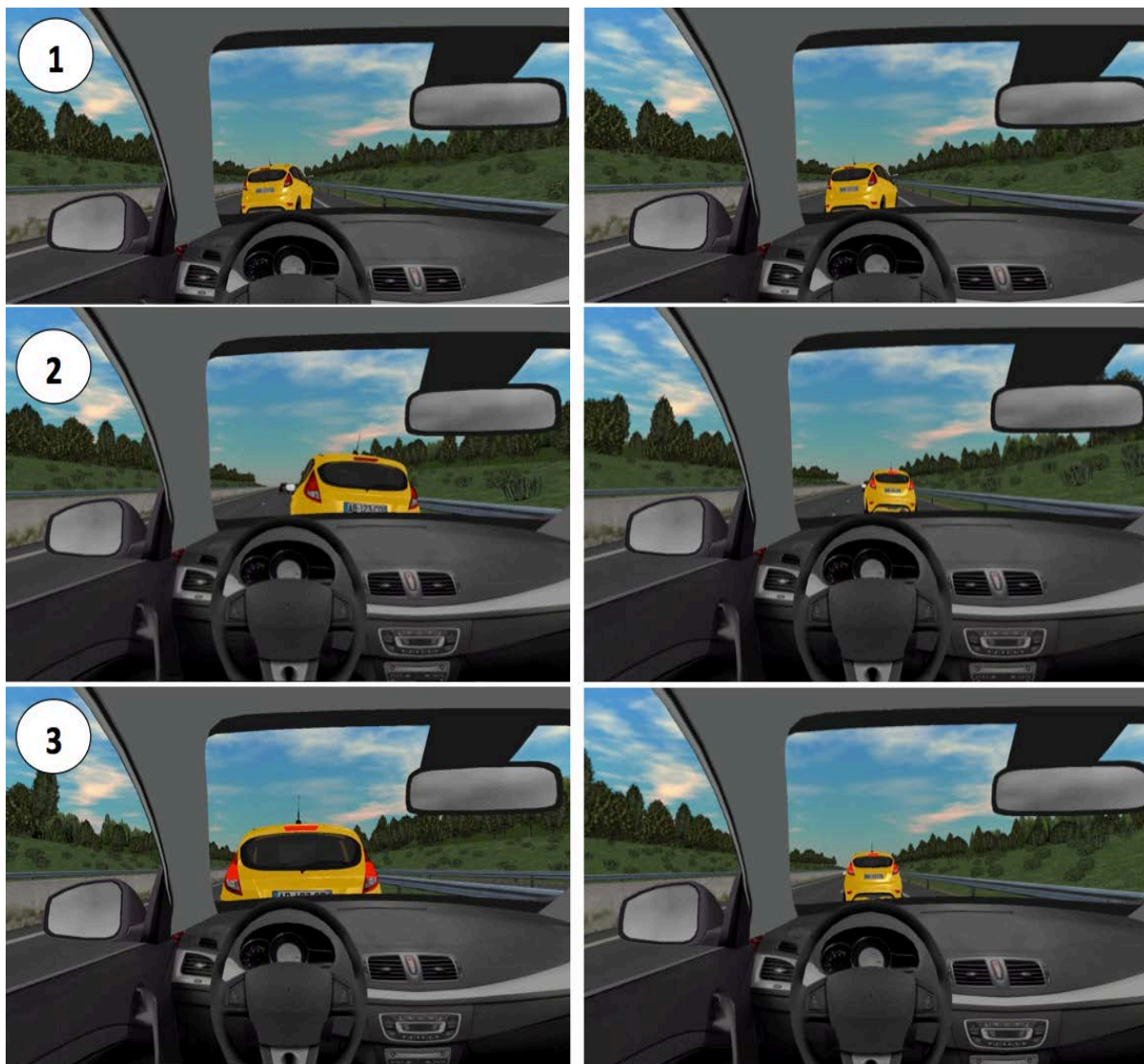


Figure 23: Gestion d'un rabatement dangereux (perte de contrôle d'un conducteur novice) par le VA de VEDECOM

Ainsi, au final, toutes les variantes de notre scénario d'intérêt ont été bien gérées par les algorithmes du VA de VEDECOM, notamment les 3 instances les plus critiques dont les simulations de démonstrations ont été présentées ci-dessus, et pour lesquelles un accident se serait inévitablement produit en l'absence de réactions appropriées de sa part.

5. Conclusion : Bilan et perspectives

L'objectif principal de la tâche 4.3 du projet SURCA était de démontrer la faisabilité et l'intérêt d'un recours à la simulation numérique pour pouvoir appréhender les bénéfices et les risques potentiels induits par l'automatisation de la conduite, avant que les VA ne soient introduits sur les routes. Dans cette optique, les partenaires de la tâche se sont attelés à la conception et au développement d'une plateforme permettant de simuler virtuellement les futures interactions entre un Véhicule Automatisé (VA) et un modèle de conducteurs capable de reproduire les comportements de véritables conducteurs humains installés au volant de véhicules conventionnels (VL).

L'originalité et l'innovation de ces travaux résident dans le recours à des modèles réalistes pour soutenir cette démarche de « co-simulation numérique ». Ainsi, pour ce qui est du VA virtuel, celui-ci est piloté par les algorithmes d'un VA de VEDECOM, permettant de reproduire les capacités décisionnelles et comportementales d'un véritable VA tel qu'il se comporterait effectivement sur la route. Du côté de la simulation des conducteurs de VL, différents comportements de conduite (basés sur des travaux antérieurs du LESCOT) ont été simulés grâce au modèle COSMODRIVE afin de reproduire (via sa calibration) les styles et/ou les erreurs de conduite de profils très contrastés de conducteurs humains (« agressifs », âgés et novices).

L'ancrage écologique des simulations réalisées sur la plateforme SURCA tient également dans la sélection du scénario d'interaction retenu comme « cas d'usage » pour la co-simulation numérique, scénario issu des travaux réalisés au préalable en tâche 4.1 et 4.2 en vue d'identifier, à partir de l'analyse des bases de données VOIESUR et FLAM (cf. Livrable SURCA 4.1), des situations d'interactions VA-VL à forts enjeux pour la sécurité routière (soit en termes d'accidents actuels à éviter dans l'avenir grâce au VA, soit en termes de situations aujourd'hui bien gérées par les conducteurs humains, mais susceptibles de poser à l'inverse des difficultés au futurs VA). Parmi celles-ci, les situations de rabattement d'un VL devant le VA sont donc apparues comme particulièrement pertinentes à étudier, en raison de leur capacité à être sources de conflits et/ou d'incidents potentiels auxquels les VA seront fréquemment confrontés, justifiant par la même la nécessité d'explorer leur aptitude à y faire face via la simulation numérique.

A cette fin, 10 variantes de ce scénario générique de rabattement d'un VL devant le VA ont été développées (« queues de poisson » plus ou moins critiques), en simulant différents profils de conducteurs (et, au-delà, de comportements et de styles de conduite), dont 3 instances susceptibles de déboucher sur un accident en cas de réactions inadéquates de la part du VA.

Au final, le Véhicule Automatisé piloté par les algorithmes d'un véritable VA de VEDECOM sur la plateforme SURCA est parvenu à gérer de façon appropriée toutes ses situations d'interactions, y compris lorsque le modèle COSMODRIVE visait à simuler des erreurs et des comportements de conduite particulièrement dangereux, attestant ainsi de son aptitude à faire face aux situations d'interaction VA-VL simulées dans le cadre de ce projet.

Si ces résultats sont loin d'être suffisants pour permettre une validation des algorithmes du VA « dans l'absolu », ils démontrent en revanche tout l'intérêt qu'il peut y avoir à recourir à une plateforme de simulation numérique telle qu'elle a été développée dans le projet pour évaluer, dans l'avenir, de telles capacités en vue de valider virtuellement des automatismes de conduite avant de déployer des VA dans le trafic.

Si les ressources limitées du projet SURCA ne pouvaient pas permettre d'explorer de façon plus approfondies les pistes ouvertes par une telle plateforme de co-simulation (en s'intéressant par

exemple à d'autres scénarios d'interactions, ou en diversifiant les profils de conducteurs), elles ont néanmoins permis de concevoir puis de déployer une démarche d'évaluation virtuelle « centrée sur les usagers » de fonctions d'automatisation de la conduite.

Dans le prolongement de la plateforme de co-simulation numérique développée pour le projet SURCA, plusieurs travaux pourraient désormais s'engager en s'appuyant sur les fonctionnalités de cet outil. Des développements additionnels réalisés au LESCOT ont permis de connecter cette plateforme avec un casque de réalité virtuelle, ce qui pourrait permettre aux conducteurs d'aujourd'hui d'expérimenter de façon immersive et réaliste les réactions du VA en prenant place au bord de ce futur type de véhicule, comme s'il était effectivement inséré dans le trafic. Cette fonctionnalité pourrait permettre de lancer des expérimentations futures pour évaluer leurs ressentis et leur acceptations envers la conduite automatisée, en cas de rabattement dangereux d'un tiers devant le VA.

En outre, au-delà de la gestion du risque de collision frontale avec la VL se rabattant devant lui, un autre risque de collision est susceptible d'apparaître avec l'arrivée des VA. En effet, comparé à un conducteur humain, le véhicule autonome est susceptible d'adopter une stratégie de freinage différente de celle d'un conducteur humain (freinage plus rapide, et potentiellement plus appuyé) qui pourrait surprendre les conducteurs humains à bord des véhicules qui le suivent. Ce risque de collision arrière n'a pas pu être investigué durant le projet SURCA (les ressources disponibles étant intégralement allouées au développement de la plateforme de simulation mais ne permettant pas de procéder à des expérimentations). Toutefois, là encore, la plateforme développée durant SURCA pourrait permettre de procéder dans l'avenir à des expérimentations impliquant de véritables conducteurs humains invités à prendre place dans le véhicule suiveur du VA (cf. véhicule blanc dans la Figure 2 de la page 14). Cela pourrait notamment permettre d'appréhender les réactions du VA du point de vue des autres conducteurs de VL situés derrière celui-ci, puis d'analyser leurs comportements face au freinage de l'automate afin d'évaluer – le cas échéant - les risques potentiels en termes de collisions arrières susceptibles d'être induites par les modalités de freinage du véhicule autonome.

6. Références

- Bellet T. (2011). Analysis, modelling and simulation of human operator's mental activities. In G.A. Boy (Ed.), *The Handbook of Human-Machine Interaction: A Human-Centered Design Approach*, Ashgate, pp. 23-52.
- Bellet, T., Bailly-Asuni, B., Mayenobe, P., Banet, A. (2009). A theoretical and methodological framework for studying and modelling drivers' mental representations, *Safety Science*, 47, pp. 1205–1221.
- Bellet T., Banet A. (2012). Towards a conceptual model of motorcyclists' Risk Awareness: A comparative study of riding experience effect on hazard detection and situational criticality assessment, *Accident Analysis and Prevention*, 49, pp. 154-164.
- Bellet T., Banet A., Petiot M., Richard B. & Quick J. (2021). Human-Centered AI to Support an Adaptive Management of Human-Machine Transitions with Vehicle Automation. *Information*, 12(1), 1-18, <https://doi.org/10.3390/info12010013>.
- Bellet T., Deniel J., Bornard J.C., Richard B. (2019). Driver Modeling and Simulation to support the Virtual Human Centered Design of future Driving Aids, *Proceeding of the INCOSE International Conference on Human-Systems Integration (HSI2019)*, Biarritz, 11-13 September 2019, 8 pages
- Bellet, T., Paris, J. C., & Marin-Lamellet, C. (2018). Difficulties experienced by older drivers during their regular driving and their expectations towards Advanced Driving Aid Systems and vehicle automation. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 52, 138-163.
- Bellet T, Tattegrain-Veste H (2003), COSMODRIVE : un modèle de simulation cognitive du conducteur automobile. In JC Spérandio et M. Wolf (Eds), *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*, Paris, Presses Universitaires de France, pp.77-110.
- Bornard J.-C., Sassman M., Bellet T. (2016). Use of a computational simulation model of drivers' cognition to predict decision making and behaviour while driving. In *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA Journal)*, 15, pp. 41-50.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*, 37(1), 32-64.
- Gruyer, D., Royere, C., du Lac, N., Michel, G., Blosseville, J.M., 2006. SiVIC and RT-MAPS Interconnected platforms for the conception and the evaluation of driving assistance systems. In: *Proceedings of the ITS World Congress*. London, UK, october.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: principles and implications of cognitive psychology*. W.H. Freeman, San Francisco.
- Paris, J. C., Bellet, T., Marin-Lamellet, C., Cour, M., Boverie, S., & Claverie, B. (2014). Assistance aux conducteurs âgés : Analyse de l'activité pour la conception de futures fonctions de monitoring de la conduite automobile. *Recherche Transport Sécurité*, Vol. 2014, pp.247-243.