

La simulation de conduite

4.1 Présentation

Le développement des simulateurs de conduite a commencé dans les années 1960, avec le Sensorama (voir figure 4.1). Ce simulateur permettait de visualiser une motocyclette se déplaçant dans les rues de Brooklyn, et proposait déjà une restitution multi-sensorielle : son stéréophonique, image couleur stéréoscopique, odeurs, vent et vibrations. Il ne permettait néanmoins pas la conduite interactive.

Avec l'apparition de l'informatique, l'interactivité est apparue et les simulateurs de conduite se sont complexifiés. Si, au départ, l'interactivité se limitait à faire varier la vitesse de défilement d'un film vidéo, les simulateurs d'aujourd'hui permettent de conduire véritablement comme dans un véhicule réel. Les simulateurs de conduite automobile ont bénéficié de l'expérience du développement des simulateurs de vol, plus anciens. Ils répondent néanmoins à une problématique bien distincte, de part les caractéristiques de la tâche de conduite (telles qu'exposées dans le premier chapitre) ainsi que de la dynamique du véhicule, qui diffèrent énormément de celles d'un avion.

La technologie de simulation de conduite est aujourd'hui grandement utilisée dans la recherche et l'industrie. Elle permet d'observer le comportement de conducteurs dans une très grande variété de situations, en facilitant les mesures et en garantissant la sécurité des conducteurs.

4.1.1 Restitution visuelle

La restitution visuelle dans un simulateur de conduite se fait grâce aux dispositifs d'affichage classiques utilisés en réalité virtuelle (Fuchs et al., 2006) : écrans multi-faces ou cylindriques sur lesquels l'image est projetée à l'aide de vidéoprojecteurs, écrans LCD, ou, plus rarement, casques



FIGURE 4.1 – Le simulateur Sensorama (Heilig, 1962).

de réalité virtuelle (Coates et al., 2002).

En conduite, la vision périphérique joue un rôle essentiel, notamment pour la perception de la vitesse. Le champ de vision horizontal est donc un paramètre majeur à prendre en compte dans la construction d'un simulateur de conduite. Kemeny et Panerai (2003) suggèrent ainsi qu'un minimum de 120° de champ de vision horizontal est nécessaire. Un champ de vision supérieur est souvent utilisé, pour une meilleure immersion.

4.1.2 Restitution haptique

Afin de recréer le ressenti des commandes d'un véhicule réel, les simulateurs embarquent généralement des moteurs capables de restituer un couple d'effort au niveau des pédales et du volant. Pour le volant en particulier, le logiciel doit intégrer un modèle de retour d'effort dépendant de l'angle volant (Toffin et al., 2007), afin de recréer artificiellement la résistance du volant (voir 2.1.3). Bertollini et Hogan (1999) ont également montré que les conducteurs préféraient un retour d'effort qui augmente avec la vitesse.

4.1.3 Interface

Pour les simulateurs de conduite les plus simples, le contrôle du véhicule peut se faire avec un simple volant de type jeu vidéo. Dans les simulateurs plus avancés en revanche, la cabine intègre une véritable planche de bord de véhicule et même parfois un véhicule réel, pour un réalisme accru.

4.1.4 Restitution de mouvements

Certains simulateurs proposent une restitution de mouvements, ou restitution inertielle. Ils sont appelés simulateurs dynamiques (par opposition aux simulateurs statiques ne restituant aucun mouvement). Pour cela, ils utilisent une plateforme mécanique dite de Gough-Stewart (voir figure 4.2). Ces plateformes relient un plateau mobile, la nacelle, à un plateau fixe, la base, par l'intermédiaire de vérins. Ces vérins permettent le déplacement ainsi que la rotation de la cabine selon les trois directions et les trois rotations de l'espace. On parle ainsi de plateforme à six degrés de liberté, ou hexapode.



FIGURE 4.2 – Plateforme de Gough-Stewart (source : CAR&D).

Afin de compenser le faible débattement des plateformes, la restitution inertielle sur les simulateurs utilise la technique de *tilt coordination*, ou récupération de gravité. Elle consiste à mettre à profit l'ambiguïté sensorielle des organes otolithiques confondant une accélération linéaire et une orientation (voir 2.1.2). Pour cela, la plateforme est inclinée afin qu'une composante de la gravité soit interprétée par les organes otolithiques comme une accélération linéaire, et provoque ainsi l'illusion du mouvement du véhicule.

Sur certains simulateurs, la base de la plateforme est également fixée sur un système de rails se déplaçant longitudinalement et/ou latéralement, afin de restituer des déplacements de plus grande amplitude.

4.1.5 Logiciel

La partie logicielle des simulateurs de conduite est complexe et comprend de nombreux modules, dont les principaux sont les suivants :

- Superviseur. Ce module permet, depuis le poste de commande, de lancer la simulation, l'arrêter, ainsi que surveiller son déroulement.
- Restitution visuelle. Ce module gère l'affichage 3D de la scène visuelle.
- Restitution sonore. Ce module gère la restitution sonore de l'environnement, et intègre un modèle pour simuler le bruit du moteur.
- Gestion de trafic. Ce module génère les véhicules du trafic et intègre un modèle de comportement pour les déplacer de façon autonome.
- Gestion des scénarios. Ce module permet de créer et exécuter des scénarios, permettant le déclenchement d'événements spécifiques pendant la simulation.
- Enregistreur. Ce module permet d'enregistrer les données de la conduite (vitesse du véhicule, angle au volant, etc) en vue de son analyse ultérieure.
- Acquisitions. Ce module gère la communication avec le matériel embarqué dans le simulateur. Son rôle est de recevoir les informations du poste de conduite (angle volant, enfoncement des pédales, rapport de boîte de vitesse, état des clignotants, etc) aussi bien que d'en envoyer pour leur affichage sur le tableau de bord (vitesse, état des systèmes d'aide à la conduite, etc).
- Modèle dynamique. Ce module intègre un modèle de comportement de véhicule, et permet de simuler sa réponse en fonction des actions du conducteur. Ce module intègre également un modèle de retour d'effort volant, ainsi que certains systèmes d'aide à la conduite comme l'ESP.
- Contrôle commande (ou *motion cueing*). Pour les simulateurs dynamiques, ce module permet de piloter les mouvements de la plateforme et/ou des rails, en fonction du comportement du véhicule simulé (Dagdelen, 2005). Ce module est également accompagné d'un programme de sécurité permettant d'interrompre la simulation en cas de déverrouillage d'un équipement de sécurité (passerelle d'accès, portillon, ceinture de sécurité, etc).

Ces différents modules sont gérés par un logiciel de simulation. Nous pouvons citer entre autres le logiciel SCANeR© distribué par la société Oktal, Sherpa développé par PSA, Vires développé par VIRE Simulationstechnologie GmbH, ou encore le logiciel open-source OpenSD2S (Filliard et al., 2010).

Ces logiciels intègrent généralement plusieurs des modules pré-cités, mais peuvent également communiquer avec des modules tiers. En effet, des modules externes sont souvent utilisés, notamment pour le modèle dynamique (comme LMS AMESim, CarMaker, ou MADA de Renault) ou la restitution sonore (comme Genesis). Les acquisitions et le contrôle commande nécessitent également un développement spécifique, en raison de leur dépendance au matériel utilisé.

4.2 Les simulateurs de conduite dans le monde

4.2.1 Simulateurs statiques

Parmi les simulateurs plus simples, également appelés *low-cost*, nous pouvons citer :

- Le simulateur Eco², développé par Oktal et Renault (figure 4.3 (a)), destiné à la formation des conducteurs à l'éco-conduite
- Le simulateur de l'IRCCyN (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes) de l'école centrale de Nantes (figure 4.3 (b))

Ces simulateurs présentent l'avantage d'être peu coûteux, et faciles à transporter.



FIGURE 4.3 – Simulateurs *low-cost* : (a) simulateur Eco² Oktal-Renault (source : Oktal), (b) simulateur de l'IRCCyN (source : Denoual et al. (2011)).

Les simulateurs statiques plus avancés intègrent un véhicule entièrement instrumenté placé devant un grand écran courbe ou multi-facettes. Nous pouvons citer par exemple :

- Le simulateur SIM² de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux). Il est composé d'un véhicule (Citroën Xantia) placé devant un écran à trois faces, pour un angle de vision de 150° (Auberlet et al., 2010; Espié et al., 2005) (figure 4.4 (a)).
- Le simulateur du Fraunhofer IAO (Allemagne), constitué d'un véhicule (Renault Scenic) ainsi que d'un écran avant à trois faces offrant un champ de vision de 180° et de deux écrans arrières (Marberger, 2008) (figure 4.4 (b)).
- Le simulateur statique de l'université de Leeds (Angleterre), constitué d'un véhicule (Rover 216) et d'un écran courbe offrant un champ de vision de 120° (Blana et Golias, 2002) (figure 4.4 (c)).

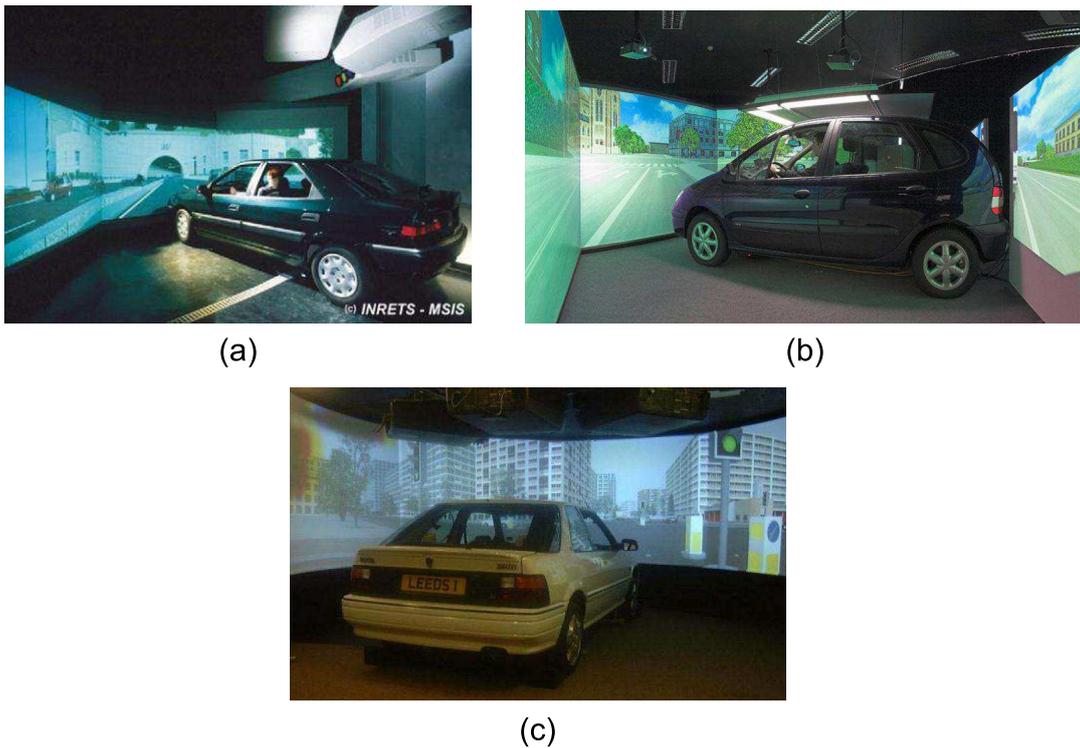


FIGURE 4.4 – Simulateurs statiques : (a) simulateur SIM² de l'IFSTTAR (source : Auberlet et al. (2010)), (b) simulateur du Fraunhofer IAO (source : ve.iao.fraunhofer.de), (c) simulateur statique de l'université de Leeds (source : Jamson et Smith (2003)).

4.2.2 Simulateurs dynamiques

De très nombreux simulateurs dynamiques intègrent la restitution des mouvements. Nous pouvons citer entre autres :

- Le simulateur SHERPA de PSA Peugeot-Citroën, également présent au LAMIH (Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines) de l'université de Valenciennes (figure 4.5 (a)). Le simulateur est constitué d'un véhicule (Peugeot 206) monté sur une plateforme Rexroth Hydraudyne, et d'un écran à trois faces offrant un champ de vision de 180° (Younsi et al., 2009).
- Le simulateur VERA du laboratoire TEST (Technology Environment Safety Transport) de l'université de Naples (Italie) (figure 4.5 (b)). Il est constitué d'une moitié de véhicule (Citroën C2) montée sur une plateforme à six degrés de liberté et placée face à un écran à trois faces offrant un champ de vision de 180°. Des écrans LCD placés dans les rétroviseurs central et extérieurs permettent la vision arrière (Torrieri et al., 2008).
- Le simulateur avancé du CARRS-Q (Centre for Accident Research and Road Safety) de l'université du Queensland (Australie) (figure 4.5 (c)) est constitué d'un véhicule (Holden VE Calais) placé sur une plateforme Rexroth et d'un écran à trois faces offrant un champ de vision de 180°. Des écrans LCD placés dans les rétroviseurs central et extérieurs permettent la vision arrière (Haines, 2011).
- Le simulateur KMUDS-4 de l'université de Kookmin (Corée) (figure 4.5 (d)), constitué d'un véhicule, d'un écran frontal à trois faces offrant un champ de vision de 140° et d'un écran arrière offrant un champ de vision de 50°. La restitution de mouvements est réalisée grâce à quatre moteurs électriques situés sous le véhicule (Lee et al., 2007).
- Le simulateur avancé du CTAG (Centro Tecnológico de Automoción de Galicia, Espagne) (figure 4.5 (e)). Un véhicule (Citroën C5) est placé dans une cabine fermée, contenant un écran frontal cylindrique offrant un champ de vision de 180° et trois écrans arrière, et montée sur une plateforme à six degrés de liberté. (Paul Tomillo et al., 2009).
- Le simulateur VIRTTEX de Ford (figure 4.5 (f)). Un véhicule est placé dans un dôme contenant un écran cylindrique frontal offrant un champ de vision de 180° et un écran cylindrique arrière offrant un champ de vision de 120° (Artz et al., 2001). Le dôme est monté sur une plateforme à six degrés de liberté.

Afin de reproduire des déplacements de plus grande amplitude, les simulateurs dynamiques peuvent également, en plus d'une plateforme à six degrés de liberté, être placés sur rails. Ces rails peuvent permettre un déplacement selon une ou deux dimensions. Pour les systèmes à une dimension, citons par exemple :

- Le simulateur MARS de l'IFAS (Institut für Fahrzeugtechnik und Antriebssystemtechnik, Allemagne). Le rail permet un déplacement latéral de 1.5 m (Breidenbach et Tomaske, 2004) (figure 4.6 (a)).
- Le simulateur III du VTI (Institut national de recherche sur la route et les transports, Suède). Le rail permet un déplacement de 7.5 m (figure 4.6 (b)). La cabine possède la particularité de pouvoir s'orienter de 90°, afin d'utiliser le rail pour reproduire des mouvements longitudinaux ou latéraux (Nordmark et al., 2004).

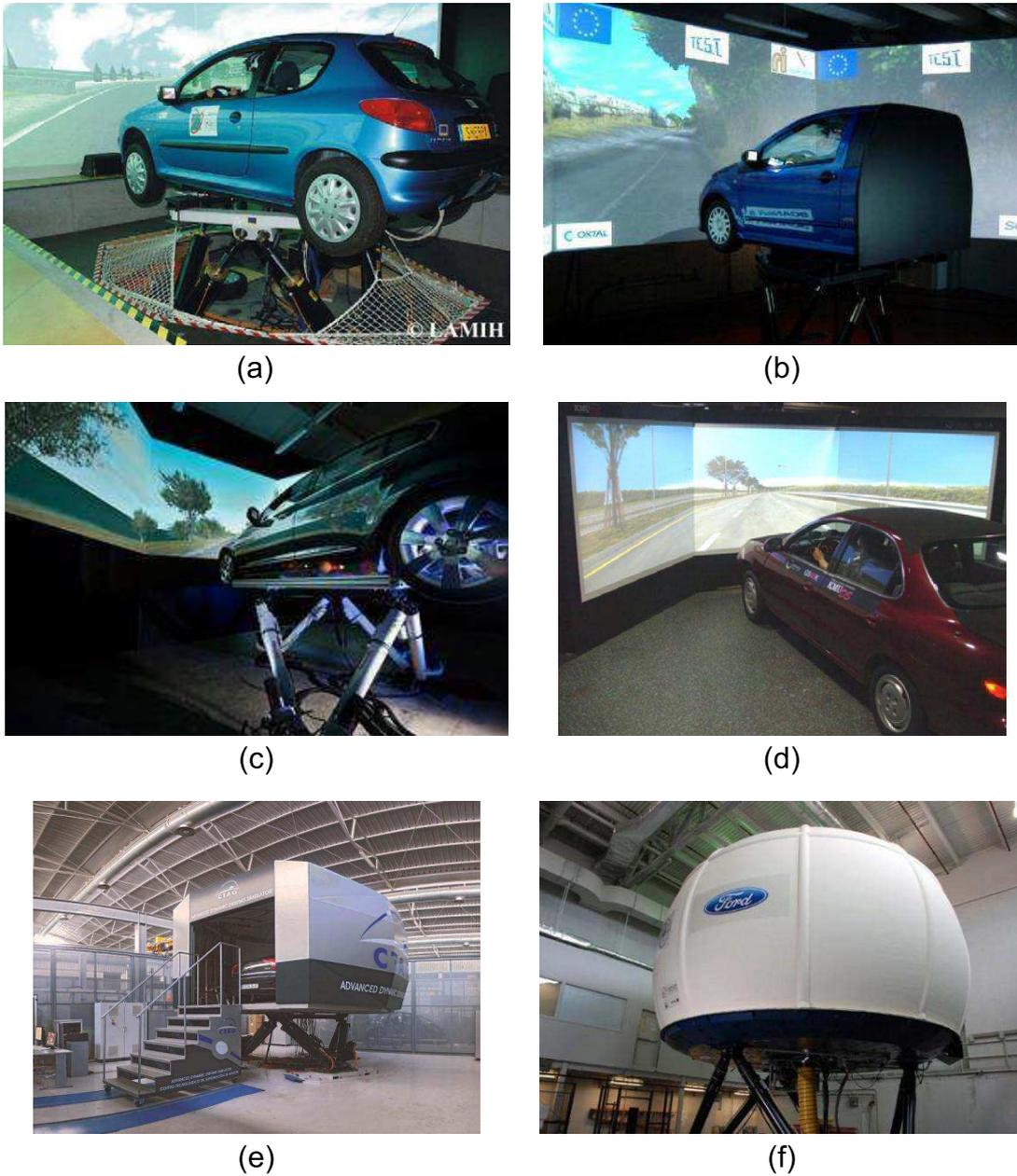


FIGURE 4.5 – Simulateurs dynamiques : (a) simulateur SHERPA du LAMIH (source : Auberlet et al. (2010)), (b) simulateur VERA du TEST (source : Galante et al. (2010)), (c) le simulateur du CARRS-Q (source : carrsq.qut.edu.au), (d) simulateur KMUDS-4 de l’université de Kookmin (source : Lee et al. (2007)), (e) simulateur du CTAG (source : cttag.com), (f) simulateur VIRTTEX de Ford (source : fordauthority.com).

- Le simulateur dynamique de Daimler (Allemagne) (figure 4.6 (c)), constitué d'un dôme contenant un véhicule et un écran cylindrique de 360°, monté sur une plateforme à six degré de liberté et un rail permettant une amplitude de mouvement de 12 m (Zeeb, 2010). La cabine s'oriente également de 90° afin d'utiliser le rail en longitudinal ou en latéral.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 4.6 – Simulateurs dynamiques avec rail à une dimension : (a) le simulateur MARS de l'IFAS (source : hsu-hh.de), (b) le simulateur III du VTI (source : vti.se), (c) le simulateur dynamique de Daimler (source : daimler.com).

Parmi les simulateurs possédant un système de rails permettant le déplacement selon deux dimensions, nous pouvons citer :

- Le simulateur dynamique de l'université de Leeds (Angleterre) (figure 4.7 (a)). Les rails permettent un déplacement de 5 m en longitudinal et en latéral.
- Le simulateur de l'université de Tongji (Chine) (figure 4.7 (b)). Les rails permettent un déplacement de 20 m en longitudinal et de 5 m en latéral.
- Le simulateur NADS-1 de l'université d'Iowa (Etats-Unis) (figure 4.7 (c)). Les rails permettent un déplacement de 19.5 m en longitudinal et en latéral (Greenberg et al., 2006). La cabine embarque un écran cylindrique de 360°.
- Le simulateur dynamique de Toyota (figure 4.7 (d)). Les rails permettent un déplacement de

35 m en longitudinal et de 20 m en latéral.

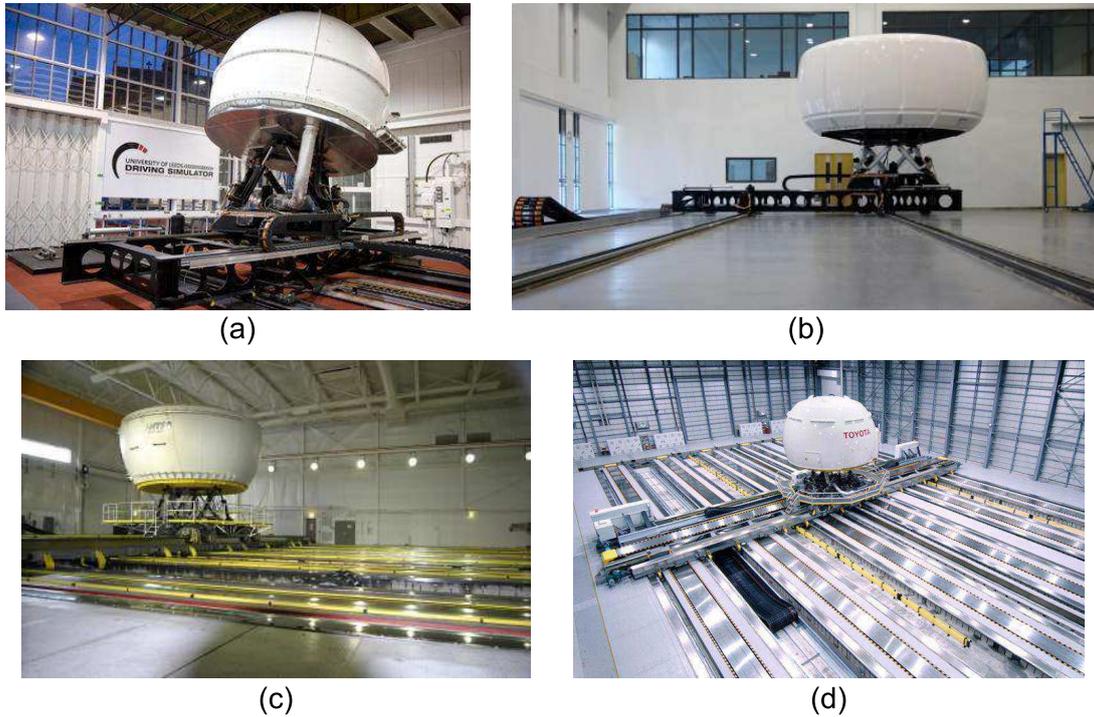


FIGURE 4.7 – Simulateurs dynamiques avec rails à deux dimensions : (a) le simulateur dynamique de l’université de Leeds (source : its.leeds.ac.uk), (b) le simulateur de l’université de Tongji (source : vectioneer.com), (c) le simulateur NADS-1 de l’université d’Iowa (source : nads-sc.uiowa.edu), (d) le simulateur de Toyota (source : motortrend.com).

Enfin, certains simulateurs dynamiques utilisent une architecture spécifique pour la restitution de mouvements :

- Le simulateur CyberMotion du MPI (Max Planck Institute, Allemagne) (figure 4.8 (a)). Il utilise un robot anthropomorphe à six degrés de liberté, sur lequel un poste de conduite et un écran courbe ont été installés (Grabe et al., 2010).
- Le simulateur Desdemonia du TNO (Organisation pour la recherche appliquée, Pays-Bas) (figure 4.8 (b)). Il consiste en un système de type centrifugeuse, initialement destiné à l’entraînement à la désorientation, qui a été adapté à la simulation de conduite (Mayrhofer et al., 2009).

4.3 Les simulateurs de conduite du CTS

Le CTS (Centre Technique de Simulation, voir 1.3.2) de Renault possède plusieurs simulateurs de conduite, destinés aux essais de différents métiers de l’entreprise. Tous ces simulateurs utilisent le logiciel SCANer©, distribué par la société Oktal, ainsi que MADA, le modèle dynamique

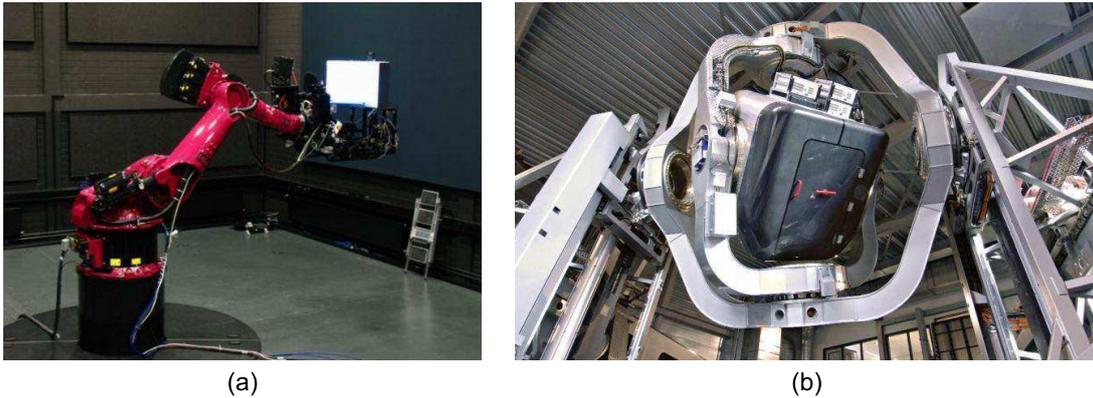


FIGURE 4.8 – Simulateurs dynamiques utilisant une architecture spécifique : (a) le simulateur Kuka du MPI (source : Grabe et al. (2010)), (b) le simulateur Desdemona du TNO (source : tno.nl).

propriétaire de Renault (voir 4.1.5).

4.3.1 Simulateurs statiques

Simulateur d'éclairage

Le simulateur d'éclairage (voir figure 4.9) est un simulateur statique, composé d'un véhicule (Renault Scenic) entièrement instrumenté, et équipé d'une boîte de vitesse automatique. La scène visuelle est projetée sur un écran cylindrique à l'aide de trois vidéoprojecteurs, offrant un angle de vision total de 210° horizontalement, et 35° verticalement.

Ce simulateur est utilisé notamment pour valider la visibilité de la route en conduite de nuit. Il a ainsi permis de s'affranchir du prototypage physique des optiques lors de la phase de conception des véhicules.

Le CTS possède également d'autres simulateurs statiques, comme le simulateur MV2I, simulateur modulaire servant pour l'évaluation d'interfaces de tableau de bord. Des postes de conduite plus simples, intégrant un volant de type jeu vidéo, sont également utilisés afin de libérer les simulateurs lors des phases de mise au point des simulations (intégration de modèles spécifiques, développement de scénarios, etc).



FIGURE 4.9 – Simulateur d'éclairage.

4.3.2 Simulateurs dynamiques

Cards2

Le simulateur Cards2 (voir figure 4.10) est composé d'une cabine équipée d'une planche de bord de Renault Mégane instrumentée, intégrant une boîte de vitesse manuelle à cinq rapports. L'image est projetée sur trois écrans, offrant un angle de vision de 150° horizontalement et 40° verticalement. Deux écrans LCD sont placés dans les rétroviseurs extérieurs, et l'image du rétroviseur central est projetée sur la partie haute de l'écran central. Le simulateur est monté sur une plateforme à six degrés de liberté, permettant un déplacement de ± 20 cm et une rotation de $\pm 20^\circ$. Pour une description plus complète du simulateur, voir Reymond et Kemeny (2000).



FIGURE 4.10 – Le simulateur Cards2.

Ultimate

Le simulateur Ultimate (voir figure 4.11) est constitué d'une cabine équipée d'une planche de bord de Renault Laguna complète. Le volant est équipé d'un système de retour d'effort actif (*i.e.* utilisant un moteur électrique), et les pédales ainsi que le levier de vitesses sont équipés d'un système de retour d'effort passif (*i.e.* utilisant des ressorts et amortisseurs). L'image est projetée sur un écran cylindrique offrant un champ de vision de 150° horizontalement et 40° verticalement.

Deux écrans LCD sont placés dans les rétroviseurs extérieurs, et l'image du rétroviseur central est projetée sur la partie haute de l'écran principal. Les mouvements du véhicule sont restitués à l'aide d'une plateforme à six degrés de liberté, se déplaçant longitudinalement et latéralement sur des rails offrant une amplitude de déplacement de 7 m par 7 m. Pour une description plus complète du simulateur, voir Dagdelen et al. (2006).



FIGURE 4.11 – Le simulateur Ultimate.

4.4 Le simulateur de conduite du Le2i

Le Le2i (Laboratoire Electronique, Informatique et Image, voir 1.3.1) possède également un simulateur de conduite. Le simulateur SAAM (voir figure 4.12) est constitué d'un véhicule (Renault Twingo) monté sur une plateforme à six degrés de liberté. L'image est projetée sur un écran cylindrique offrant un champ de vision de 150°. Pour une description plus complète du simulateur, voir Colombet et al. (2010).



FIGURE 4.12 – Le simulateur SAAM.

4.5 Validité des simulateurs

4.5.1 Comparaison entre simulation et réalité

Dans l'optique d'utiliser les simulateurs de conduite pour observer le comportement des conducteurs, la question de validité de l'outil se pose : dans quelle mesure les résultats obtenus sur simulateur sont-ils applicables à la conduite sur véhicule réel ?

De nombreuses études ont comparé le comportement des conducteurs sur simulateur et sur véhicule réel. Plusieurs auteurs se sont par exemple intéressés à la tâche de freinage, et ont montré que les conducteurs commençaient à freiner plus tard sur un simulateur que sur un véhicule réel (Kaptein et al., 1996; Cavallo, 1999; Brünger-Koch et al., 2006). Brünger-Koch et al. (2006) suggèrent que ce comportement est dû à une sous-estimation de la vitesse. Les expérimentations menées par Boer et al. (2000) et Marberger (2008) ont également montré que lors du freinage, la décélération maximale était plus forte sur simulateur que sur véhicule réel.

Marberger (2008) a également observé des différences lors de prises de virage aux intersections : les corrections au volant étaient plus nombreuses sur simulateur que sur véhicule réel. L'auteur rapporte par contre que les performances pour le maintien du véhicule sur sa voie, tout en réalisant une tâche distractive, étaient comparables entre simulation et réalité. Blana et Golias

(2002) ont en revanche observé entre la conduite sur véhicule réel et sur simulateur statique, des différences sur l'écart latéral : celui-ci était plus faible et de plus grande variabilité sur le simulateur.

Guzek et al. (2006) se sont intéressés aux manœuvres d'urgence, et ont étudié la réaction des conducteurs lorsqu'un véhicule surgissait subitement sur la droite de la route, sur un véhicule réel et sur un simulateur statique. Les auteurs ont observé sur simulateur une proportion plus importante de sujets décidant de freiner que sur véhicule réel, mais des temps de réaction très comparables entre les deux situations. Greenberg et al. (2006) ont en revanche observé des temps de réaction différents, pour des manœuvres de freinage et de dépassement d'urgence, entre un véhicule réel et deux simulateurs statiques.

4.5.2 La notion de validité

Dans l'optique d'étudier un simulateur de conduite pour observer le comportement des conducteurs, son domaine de validité doit être soigneusement étudié. Mudd (1968) définit la validité d'un simulateur comme la capacité de reproduire un environnement comportemental. Selon Leonard et Wierwille (1975), la validation d'un simulateur passe par un ajustement des conditions expérimentales afin d'obtenir une correspondance entre les mesures effectuées en simulation et en réalité.

Blaauw (1982) distingue deux niveaux de validité, qui ne sont pas nécessairement reliés : la validité physique et la validité comportementale. La validité physique concerne la correspondance quantifiée entre les caractéristiques physiques du simulateur et du véhicule réel (dynamique du véhicule, stimuli sensoriels). Elle est équivalente à la notion de fidélité (Godley et al., 2002). La validité comportementale représente la correspondance entre le comportement observé en conduite réelle et en simulation. Elle est également appelée validité prédictive (Godley et al., 2002) ou validité par objectif (Espié et al., 2005).

Blaauw (1982) précise que la validité comportementale peut être absolue ou relative (voir figure 4.13). Une validité absolue signifie que les grandeurs mesurées sont à peu près égales entre la réalité et la simulation. Une validité relative signifie que les différences de performances entre différentes conditions expérimentales sont de même ordre et de même direction sur simulateur que sur un véhicule réel.

Kaptein et al. (1996) précisent que pour qu'un simulateur soit considéré comme valide, tous les éléments de la simulation n'ont pas forcément besoin d'être identiques à la réalité. En revanche, les indices sensoriels essentiels pour la tâche étudiée se doivent d'être valides. En outre, Törnros (1998) suggère que, pour qu'un simulateur soit un outil de recherche efficace, la validité absolue n'est pas nécessaire mais la validité relative est indispensable.

Malaterre et Fréchaux (2001) ont complété la définition de la validité, et en ont distingué quatre niveaux :

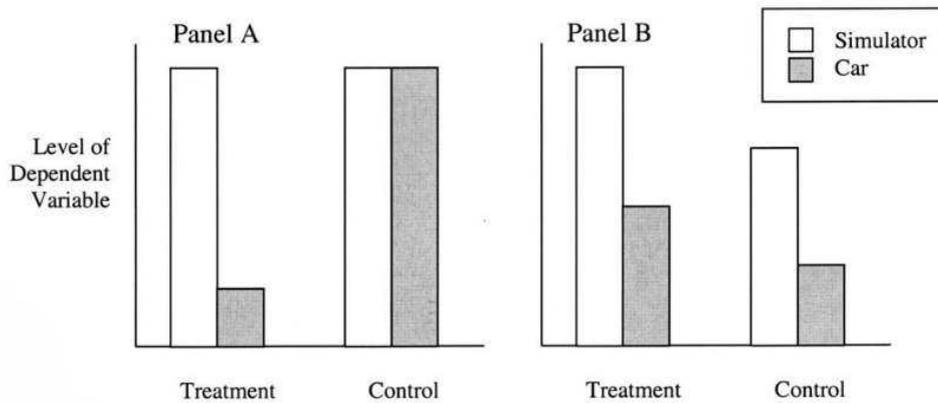


FIGURE 4.13 – Exemples hypothétiques : le panel A présente une validité absolue pour le groupe de contrôle, mais pas de validité relative pour l'effet du traitement ; au contraire, le panel B ne présente pas de validité absolue, mais une validité relative pour l'effet du traitement (tiré de Godley et al. (2002)).

- La validité physique, représentant la fidélité des stimuli que reçoivent les conducteurs
- La validité expérientielle, décrivant l'évaluation subjective par les conducteurs de la ressemblance entre la situation simulée et la réalité (proche de la notion de réalisme)
- La validité éthologique, concernant la similitude des comportements observés entre réalité et simulation
- La validité psychologique, définissant la similitude entre les mécanismes cognitifs des conducteurs entre réalité et simulation (rythme cardiaque, coût cognitif, etc).

Jamson et Smith (2002) ajoutent à cela le concept de validité émotionnelle, concernant la similarité des états émotionnels ressentis par les conducteurs entre une conduite réelle et une conduite simulée. Ces états émotionnels peuvent être mesurés par l'activité électromyographique, l'activité électrodermale, ou par électrocardiogramme.

Enfin, la validité écologique, relative à un protocole expérimental plus qu'à un simulateur, signifie que la situation étudiée reproduit une situation naturelle, contrairement à une situation artificielle conçue spécifiquement pour la recherche (Hoc, 2001).

4.5.3 Influence de la restitution de mouvements

De nombreuses études se sont penchées sur l'intérêt de la restitution de mouvements pour la simulation de conduite automobile. Les expérimentations de Parrish et Martin (1976), de Reid et Nahon (1988) ainsi que de Feenstra et al. (2009) ont montré une préférence subjective des conducteurs pour la simulation en présence de restitution inertielle.

McLane et Wierwille (1975) ont montré que l'absence de restitution de mouvements provoquait une dégradation de la performance de guidage des conducteurs (déviation latérale et de lacet). Les auteurs ont également observé un plus grand nombre de corrections au volant en simulation dynamique, suggérant une meilleure perception des déviations. Repa et al. (1982) ont également observé, lors d'une tâche de suivi de trajectoire en présence de vents latéraux, une diminution de 30% de l'écart latéral maximal et une diminution de 15% de l'angle volant maximal en présence de restitution de mouvements. Wierwille et al. (1983) ont observé une diminution du temps de réaction à un coup de vent latéral en simulation dynamique.

Reymond et al. (2001) ont montré l'importance de la restitution inertielle pour la régulation de la vitesse lors de la prise de virage, celle-ci aidant les conducteurs à maintenir l'accélération latérale du véhicule en-dessous d'un seuil. Correia Grácio et al. (2011) ont obtenu un résultat similaire pour une conduite en slalom. Les auteurs ont également observé que l'angle au volant sur simulateur statique était plus bruité, c'est-à-dire que les conducteurs effectuaient plus de corrections à haute fréquence. Les auteurs suggèrent que l'absence de restitution inertielle entrave la perception du risque.

Siegler et al. (2001) se sont intéressés à la tâche de freinage sur simulateur. Les auteurs ont observé une décélération maximale plus faible sur simulateur dynamique que sur simulateur statique, se rapprochant ainsi plus du comportement de freinage observé sur véhicule réel par Boer et al. (2000) (voir 4.5.1).

4.5.4 Le mal du simulateur

La cinétose est une réaction physiologique entraînant des symptômes tels que le mal de tête ou la nausée, en réaction à un mouvement. Elle peut prendre de nombreuses formes suivant le moyen de transport utilisé : mal de mer, de l'air ou de voiture. Les simulateurs de conduite n'échappent pas à ce phénomène, et certains sujets peuvent parfois ressentir le mal du simulateur.

La théorie la plus largement répandue pour expliquer le mal du simulateur et les cinétoses d'une manière générale est la théorie du conflit sensoriel (Reason et Brand, 1975). Selon les auteurs, la cinétose peut être expliquée par un conflit entre les informations de mouvement reçues par voie visuelle, vestibulaire et proprioceptive, non seulement entre elles, mais aussi et surtout par rapport à un mouvement attendu, en fonction de l'expérience passée. Ces conflits peuvent être intermodaux (par exemple entre les systèmes visuel et vestibulaire) aussi bien qu'intra-modaux (par exemple entre les canaux semi-circulaires et les organes à otolithes du système vestibulaire) (Pinto, 2007).

Pinto et al. (2008) insistent donc sur l'importance de la stimulation multisensorielle, et en particulier la restitution de mouvements, pour limiter les effets de cinétose lors de la simulation de conduite.

Afin de mesurer le mal du simulateur, Kennedy et al. (1993) ont développé un questionnaire,

le *Simulator Sickness Questionnaire*, permettant d'évaluer la sévérité du mal du simulateur ressenti par les conducteurs. Pour cela, l'intensité de plusieurs symptômes sont notés, selon trois dimensions : nausée, problèmes oculomoteurs et désorientation.

En utilisant ce questionnaire, de nombreuses études ont montré que le phénomène de mal du simulateur était largement réduit en présence de restitution de mouvements (Watson, 2000; Curry et al., 2002; Correia Grácio et al., 2011). Un autre facteur déterminant pour la simulation de conduite est la durée de simulation. En effet, de nombreuses études ont montré que plus la session de simulation est longue, plus la possibilité de ressentir des symptômes de cinétose est élevée (voir par exemple McCauley et Sharkey (1992); Cobb et al. (1999); Lo et So (2001)). Certaines manœuvres peuvent également augmenter le risque de mal du simulateur si elles sont trop nombreuses, comme le freinage ou les virages serrés (Roe et al., 2007). Ces paramètres doivent donc être pris en compte lors de l'élaboration de protocoles expérimentaux.

