

UNIVERSITÉ PARIS DESCARTES INSTITUT DE PSYCHOLOGIE
École doctorale 261 « Cognition, Comportements, Conduites Humaines »

THÈSE

Spécialité : Psychologie Cognitive

Valentin Corneloup

Apprentissage et évaluation des compétences de conduite de haut niveau en réalité virtuelle

Utilisation des simulateurs de conduite pour mesurer et développer les compétences perceptives et cognitives des conducteurs novices

Laboratoire de Psychologie des Comportements et des mobilités, IFSTTAR

Laboratoire de Psychologie et d'Ergonomie Appliquée, Université Paris Descartes

Avec le soutien de l'Agence Nationale de la Recherche

Jury

M.A. Amorim, Professeur des universités, Université Paris-Sud – Rapporteur

F. Ganier, Professeur des universités, Université de Bretagne Occidentale – Rapporteur

M. Bétrancourt, Professeure, Université de Genève – Examinatrice

G. Kermarrec, Professeur des universités, Université de Bretagne Occidentale – Examineur

I. Milleville, Chargée de Recherche – HDR, CNRS Nantes - Examinatrice

J.M. Burkhardt, Directeur de Recherche, IFSTTAR – Directeur de thèse



IFSTTAR



UNIVERSITÉ
PARIS
DESCARTES

ANR
AGENCE
NATIONALE
DE LA
RECHERCHE

1	<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	13
1.1	DU CONSTAT DU SUR-RISQUE DES JEUNES CONDUCTEURS AU COURS DES PREMIERS MOIS DE LA CONDUITE...	13
1.2	A LA QUESTION DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU ET DE LEUR DEVELOPPEMENT AU MOYEN DE LA REALITE VIRTUELLE	14
1.3	PRESENTATION DE LA THESE	16
1.3.1	OBJECTIFS	16
1.3.2	PLAN	16
1.3.3	CONTEXTE : LE PROJET MACCOY CRITICAL	17
2	<u>APPRENDRE A CONDUIRE, QUELS APPORTS DE LA REALITE VIRTUELLE POUR LA FORMATION DES COMPETENCES ?</u>	21
2.1	LA CONDUITE, QUELLE ACTIVITE ?	21
2.1.1	CONDUIRE, CONTROLER SON DEPLACEMENT AU SEIN D'UN ENVIRONNEMENT DYNAMIQUE	21
2.1.2	UNE HIERARCHIE DE TACHES MULTIPLES	21
2.1.3	UNE ACTIVITE DECOMPOSABLE SELON TROIS NIVEAUX STRATEGIQUE, TACTIQUE ET OPERATIONNEL	21
2.2	LES COMPETENCES DE CONDUITE	22
2.2.1	COMPETENCES, CONNAISSANCES ET PERFORMANCE	22
2.2.2	UN REFERENTIEL GENERAL DES COMPETENCES DE CONDUITE, LA MATRICE GDE	25
2.3	L'APPRENTISSAGE DE LA CONDUITE, ENTRE FORMATIONS ET APPRENTISSAGES AUTONOMES	27
2.3.1	LA FORMATION A LA CONDUITE EN FRANCE ET DANS LE MONDE	27
2.3.2	UN APPRENTISSAGE AUTONOME POST-PERMISS DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU : ETAPES ET PROCESSUS	29
2.3.3	SITUATIONS CRITIQUES ET APPRENTISSAGE	32
2.4	APPORTS DE LA REALITE VIRTUELLE ET DE LA SIMULATION POUR LA FORMATION A LA CONDUITE	33
2.4.1	REALITE VIRTUELLE ET SIMULATION POUR LA FORMATION	33
2.4.2	POTENTIALITES DE CES TECHNOLOGIES POUR LA FORMATION A LA CONDUITE	34
2.4.3	DEUX FACTEURS D'ACCEPTABILITE IMPORTANTS DES SIMULATEURS	35
2.5	CONCLUSION	36
3	<u>LES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU</u>	37
3.1	LES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES	39
3.1.1	L'EVALUATION DES SITUATIONS DE CONDUITE	39
3.1.2	LA PRISE DE DECISION EN SITUATION DE CONDUITE	40
3.2	LES COMPETENCES D'AUTOEVALUATION ET DE GESTION DES RESSOURCES PERSONNELLES ET DU CONTEXTE DE LA CONDUITE	43
3.2.1	AUTO-EVALUER ET GERER LE CONTEXTE INTERNE DE LA CONDUITE	44
3.2.2	GERER LE CONTEXTE EXTERNE DE LA CONDUITE	45
3.3	L'IMPLICATION DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU DANS LE SUR-RISQUE DES NOVICES : DONNEES ISSUES DE L'ACCIDENTOLOGIE	46
3.3.1	DES SITUATIONS ACCIDENTELLES ET PRESQUE ACCIDENTELLES	46
3.3.2	CAUSES ET CARACTERISTIQUES DES SITUATIONS DANGEREUSES	46
3.4	CONCLUSION	48

4	<u>DEVELOPPER LES COMPETENCES DE CONDUITE PERCEPTIVES ET COGNITIVES EN REALITE VIRTUELLE</u>	49
4.1	INTRODUCTION	49
4.2	USAGE DES SIMULATEURS POUR LA FORMATION DES NOVICES : UN ETAT DES LIEUX	50
4.2.1	SIMULER LA CONDUITE POUR LA FORMATION : ELEMENTS SPECIFIQUES	50
4.2.2	TYPLOGIE DES USAGES DES SIMULATEURS DE CONDUITE DANS LA FORMATION	52
4.2.3	QUELLE EFFICACITE DES FORMATIONS SUR SIMULATEURS	61
4.3	UN FOCUS SUR LES RETROACTIONS FORMATIVES	64
4.3.1	LES RETROACTIONS FORMATIVES, ESSENTIELLES POUR FAVORISER L'APPRENTISSAGE EXPERIENTIEL	64
4.3.2	CARACTERISTIQUES MODULANT L'EFFICACITE DES RETROACTIONS FORMATIVES	65
4.3.3	LA QUESTION DE LA COHERENCE NARRATIVE DES RETROACTIONS FORMATIVES	66
4.3.4	UNE EFFICACITE RELATIVE DIFFICILE A ETABLIR	68
4.4	CONCLUSION	69
5	<u>ÉVALUER LES COMPETENCES DE HAUT NIVEAU PERCEPTIVES ET COGNITIVES : MESURES « SITUEES » EN REALITE VIRTUELLE</u>	71
5.1	ÉVALUER L'EFFICACITE DE L'ENTRAINEMENT PAR LA MESURE DE L'EFFET DE TRANSFERT	71
5.1.1	PROTOCOLES D'ÉVALUATION DU TRANSFERT	71
5.1.2	CARACTERISER LA DISTANCE DU TRANSFERT	73
5.1.3	TYPLOGIE DES SITUATIONS POUR EVALUER LE TRANSFERT	74
5.2	UN FOCUS SUR LES SITUATIONS CONTENANT UN DANGER	77
5.2.1	SITUATIONS COUVERTES	79
5.2.2	SITUATIONS OUVERTES	80
5.2.3	SITUATIONS D'INTRUSION	81
5.3	INDICATEURS POUR L'ÉVALUATION DES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES EN CONDUITE SIMULEE	82
5.3.1	APPROCHES VERBALES	82
5.3.2	COMPORTEMENTS OCULOMOTEURS	83
5.3.3	COMPORTEMENTS DE CONDUITE	88
5.4	CONCLUSION	90
6	<u>PROBLEMATIQUE</u>	93
6.1	IDENTIFIER LES CARACTERISTIQUES DES SITUATIONS REELLES IMPLIQUEES DANS L'ACQUISITION DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU	93
6.2	PROPOSITION DE SITUATIONS ET D'INDICATEURS ASSOCIES POUR MESURER LES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES EN REALITE VIRTUELLE	94
6.3	EVALUATION DE MODALITES DE RETROACTIONS POUR LA FORMATION DES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES « PAR SIMULATEUR »	95
7	<u>ÉTUDE 1 : QU'APPRENNENT LES CONDUCTEURS NOVICES PAR L'EXPERIENCE DE SITUATIONS CRITIQUES, LORS DES PREMIERS TEMPS DE LA CONDUITE AUTONOME ?</u>	99
7.1	INTRODUCTION	99
7.2	MATERIEL ET METHODE	99
7.2.1	PARTICIPANTS	99
7.2.2	ENTRETIENS SEMI-STRUCTURES BASES SUR LA TECHNIQUE DES INCIDENTS CRITIQUE	99
7.2.3	PROCEDURE	100

7.2.4	ANALYSE DES DONNEES	101
7.3	RESULTATS	104
7.3.1	CONDITIONS DE CONDUITE, CONSEQUENCES, VALENCE ET CONFIGURATION ROUTIERE	104
7.3.2	ELEMENTS DECLENCHEURS ET FACTEURS CAUSAUX ASSOCIES AUX SITUATIONS CRITIQUES	105
7.3.3	COMPETENCES APPRISES OU DEVELOPPEES A LA SUITE DE L'EXPERIENCE D'UNE SITUATION CRITIQUE	105
7.3.4	RELATIONS ENTRE SITUATIONS CRITIQUES VECUES, ET COMPETENCES DEVELOPPEES	107
7.4	DISCUSSION	110
7.4.1	DES SITUATIONS CAUSEES PAR DES DEFAILLANCES DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU	110
7.4.2	DEVELOPPEMENT DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU ET LIENS AVEC LES SITUATIONS CRITIQUES DE CONDUITE	111
7.4.3	LA TECHNIQUE DES INCIDENTS CRITIQUES, UNE APPROCHE PERTINENTE ET COMPLEMENTAIRE POUR ETUDIER LE SUR-RISQUE DES CONDUCTEURS	113
7.5	CONCLUSION, LIMITES ET PERSPECTIVES	114
7.5.1	LIMITES	114
7.5.2	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	114

8 ÉTUDE 2 : MESURER LES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES DE CONDUITE EN REALITE VIRTUELLE : APPORTS D'INDICATEURS COMBINES **115**

8.1	INTRODUCTION	115
8.1.1	DES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES NECESSAIRES POUR ANTICIPER LES SITUATIONS DE CONDUITE	115
8.1.2	DEUX SITUATIONS QUI MOBILISENT DE FAÇON DIFFERENCIEE LES COMPETENCES D'ANTICIPATION DES CONDUCTEURS	116
8.1.3	DES INDICATEURS ACTUELS QUI NE PERMETTENT PAS TOUJOURS DE MESURER LES COMPETENCES D'ANTICIPATION DES CONDUCTEURS	116
8.1.4	APPORTS POTENTIELS D'INDICATEURS COMBINES POUR LA MESURE DES COMPETENCES D'ANTICIPATION	117
8.1.5	HYPOTHESES	118
8.2	MATERIEL ET METHODE	118
8.2.1	PLAN EXPERIMENTAL	118
8.2.2	PARTICIPANTS	120
8.2.3	MATERIEL	121
8.2.4	PROCEDURE	123
8.2.5	DONNEES RECUEILLIES	124
8.2.6	SPECIFICITE DES ANALYSES PAR SITUATION	129
8.2.7	ANALYSES STATISTIQUES, TESTS ET COMPARAISONS EFFECTUES	130
8.3	RESULTATS	131
8.3.1	DIFFERENCES DE VITESSES INITIALES ET VUE GENERALE DES VARIATIONS DE VITESSE	131
8.3.2	LES SITUATIONS D'INTRUSION NE METTENT PAS EN EVIDENCE DE DIFFERENCES ENTRE CONDUCTEURS EXPERIMENTES ET NOVICES	133
8.3.3	LES CONDUCTEURS EXPERIMENTES ANTICIPENT PLUS EFFICACEMENT LES DANGERS COUVERTS QUE LES CONDUCTEURS NOVICES	134
8.3.4	LES CONDUCTEURS EXPERIMENTES ANTICIPENT PLUS EFFICACEMENT LES DANGERS OUVERTS QUE LES CONDUCTEURS NOVICES EN SITUATIONS OUVERTES	139
8.4	DISCUSSION	141
8.4.1	EVALUER LES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES DES CONDUCTEURS EN REALITE VIRTUELLE	141
8.4.2	DES COMPETENCES D'ANTICIPATION INFLUENCEES PAR DES DIFFERENCES DE SURFACES ENTRE SITUATIONS COUVERTES	142
8.4.3	IMPLICATIONS THEORIQUES	143
8.5	LIMITES, CONCLUSION ET PERSPECTIVES	144
8.5.1	LIMITES	144

8.5.2	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	145
9	ETUDE 3 : DEVELOPPER LES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES EN REALITE VIRTUELLE : EVALUATION DE 2 MODALITES DE RETROACTIONS FORMATIVES	147
9.1	INTRODUCTION	147
9.1.1	DISTANCE INTER-SITUATIONS POUR EVALUER L'EFFET DE TRANSFERT DE L'ENTRAINEMENT	147
9.1.2	MODALITES DE RETROACTIONS FORMATIVES POUR FAVORISER L'APPRENTISSAGE DES COMPETENCES	148
9.1.3	HYPOTHESES	149
9.2	MATERIEL ET METHODE	150
9.2.1	PLAN EXPERIMENTAL	150
9.2.2	PARTICIPANTS	150
9.2.3	MATERIEL	151
9.2.4	PROCEDURE	154
9.2.5	DONNEES RECUEILLIES	155
9.2.6	ANALYSES STATISTIQUES, TESTS ET COMPARAISONS EFFECTUES	158
9.3	RESULTATS	158
9.3.1	DIFFERENCES DE VITESSES INITIALES ET VUE GENERALE DES VARIATIONS DE VITESSE	158
9.3.2	LES RETROACTIONS EXTRADIEGETIQUES S'ACCOMPAGNENT D'UN TRANSFERT PLUS IMPORTANT SUR LES SITUATIONS SIMILAIRES	160
9.3.3	LES RETROACTIONS EXTRADIEGETIQUES S'ACCOMPAGNENT D'UN TRANSFERT PLUS IMPORTANT SUR LES SITUATIONS PROCHES	164
9.3.4	LES RETROACTIONS EXTRADIEGETIQUES ET INTRADIEGETIQUES NE S'ACCOMPAGNENT PAS D'UN EFFET DE TRANSFERT SUR LES SITUATIONS LOINTAINES	169
9.4	DISCUSSION	170
9.4.1	DES EFFETS DE TRANSFERT SEULEMENT OBSERVES EN SITUATIONS SIMILAIRES ET PROCHES	170
9.4.2	EFFICACITE COMPAREE DES MODALITES DE RETROACTION FORMATIVES EXTRA ET INTRADIEGETIQUES	171
9.4.3	IMPLICATIONS THEORIQUES	173
9.5	CONCLUSION, PERSPECTIVES ET LIMITES	174
9.5.1	LIMITES	174
9.5.2	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	174
10	DISCUSSION GENERALE	179
10.1	L'ACQUISITION DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU DURANT LES PREMIERS MOIS DE LA CONDUITE	179
10.1.1	UN APPRENTISSAGE EXPERIENTIEL DURANT LES PREMIERS MOIS DE LA CONDUITE AUTONOME	179
10.1.2	COMPETENCES IMPLIQUEES DANS L'OCCURRENCE DE SITUATIONS CRITIQUES	180
10.1.3	APPORTS POUR LA COMPREHENSION DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU	181
10.1.4	RESUME SCHEMATIQUE DES CONTRIBUTIONS DE LA THESE CONCERNANT L'ACQUISITION ET LA COMPREHENSION DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU	182
10.2	L'EFFICACITE DE LA REALITE VIRTUELLE ET DU SIMULATEUR POUR LE DEVELOPPEMENT DES COMPETENCES DE HAUT NIVEAU	184
10.2.1	LES INDICATEURS D'EVALUATION DES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES	184
10.2.2	L'EFFICACITE DES RETROACTIONS POUR L'APPRENTISSAGE « PAR SIMULATEUR »	186
10.2.3	LA QUESTION DE LA DISTANCE DU TRANSFERT POUR L'APPRENTISSAGE	188
10.2.4	UTILISATION DES SIMULATEURS POUR ENTRAINER ET EVALUER LES COMPETENCES DE CONDUITE	189
11	LIMITES, PERSPECTIVES ET CONCLUSION	190

11.1 LIMITES	190
11.2 PERSPECTIVES	190
11.2.1 PERSPECTIVES POUR L'ETUDE ET L'ENTRAINEMENT DES COMPETENCES DE CONDUITE DE HAUT NIVEAU	190
11.2.2 PERSPECTIVES ET PISTES D'AMELIORATIONS DES SYSTEMES DE REALITE VIRTUELLE POUR L'EVALUATION ET L'ENTRAINEMENT DES COMPETENCES PERCEPTIVES ET COGNITIVES	192
11.3 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	192
BIBLIOGRAPHIE	195
LISTE DES FIGURES	219
LISTE DES TABLEAUX	223
ANNEXES	225

Remerciements

Mes premiers remerciements se dirigent vers mon directeur de thèse. Jean-Marie, merci de votre exigence, qui m'a toujours poussée à aller au-delà de ce dont je pensais être capable et à toujours m'améliorer. Merci de m'avoir appris la rigueur et l'esprit critique. Merci de votre ouverture et de votre curiosité scientifique qui m'ont permis de dépasser les clivages théoriques et expérimentaux. En somme, merci de m'avoir appris à être un chercheur.

Merci également aux membres de mon jury, Michel-Ange Amorim et Franck Ganier d'avoir accepté de rapporter mon travail ; Mireille Bétrancourt, Isabelle Milleville et Gilles Kermarrec d'avoir accepté d'examiner mon travail. C'est un honneur pour moi que vous ayez accepté de consacrer du temps et de l'énergie à mon humble travail de thèse.

Merci au Laboratoire de Psychologie des Comportements et des mobilité (IFSTTAR), au sein duquel j'ai évolué pendant près de 4 ans. Merci à Brigitte, d'avoir toujours faciliter les choses, même lorsque je vous demandais un billet de train à la dernière minute ou que les budgets étaient fermés. Merci à Aurélie, Clément et Julien, pour leur bonne humeur, leurs conseils et leur enthousiasme. Merci à Vanessa, pour nos discussions devant nos plats micro-ondes du midi et pour son engagement auprès des autres doctorants. Merci aussi à tous les autres pour la bonne humeur constante qui règne dans ce laboratoire.

Un remerciement spécial à Valérie. Merci de votre présence et de votre soutien dans les moments les plus difficiles. Merci de votre bienveillance et de votre humour dans les moments les plus faciles. Valérie, sachez que vous avez été bien plus que ma directrice de laboratoire durant ces quelques années.

Un remerciement spécial également à Nadine, dont le soutien aura su me faire traverser les moments de tensions et de stress. J'espère avoir l'occasion de poursuivre une de nos discussions passionnantes, entamées au crépuscule, après que les couloirs du labo aient été désertés.

A ceux qui ne sont plus au labo, également merci. À Angélique, merci pour nos débats passionnés et passionnants. J'espère que tu es heureuse dans ta Bretagne. A Elise, merci pour tes conseils, nos discussions et toutes ces heures salvatrices passées au sport. A quand un marathon ensemble ?

Un énorme merci à Fabrice et à Thong, sans le dévouement desquels aucune des expérimentations de cette thèse n'aurait pu avoir lieu. Merci pour les heures accordées à mon travail. Fabrice, merci pour ton engagement, inversement proportionnel à la vitesse avec laquelle tu manges tes repas à la cantine. Thong, merci pour les heures passées avec moi dans le simu... et au foot. J'espère continuer à vous voir tous les deux, en dehors ou non du travail.

Merci également l'Agence Nationale de la Recherche et aux membres du projet McCoy, Francis, Catherine G., Domitile, Vanda, Catherine D., Philippe, Azzedine, Anaïs et à ceux que j'oublie peut-être. Une pensée toute particulière pour Yannick, mon alter-égo du côté informatique. J'espère sincèrement que nos chemins, professionnel comme personnel, nous donnerons d'autres occasions de nous côtoyer à l'avenir.

Merci aux stagiaires et étudiants de master que j'ai pu avoir la chance d'encadrer. Merci à Iliana et à Estelle. Merci à Cécile et Clarisse pour les heures passées au simu à supporter vos mal de crânes et autres nausées pour m'aider à tester et retester ces satanés circuits expérimentaux. Vous étiez mes premières « stagiaires » et vous savez que vous aurez toujours un statut spécial pour moi... Merci à Julie, pour son engagement, son sérieux et sa persévérance. Tu as un avenir dans ce métier, n'en doute pas ! Merci à Max pour son enthousiasme sans faille et pour avoir commis le geste insensé de travailler pendant deux ans avec moi.

Merci aux amis pour leur soutien. Merci à Jenn pour ta compréhension, ta générosité et ton abnégation sans borne. Merci pour tous ces kilomètres que tu as consenti à parcourir, même épuisée, même alors que tu gérais 5 opé' et 12 dossiers en même temps. Merci à Romain, toi et moi on se soutien tu le sais. Merci à Beren pour m'avoir supporté pendant 2 ans dans le même bureau. Un courage impressionnant. Merci à Sami pour nos discussions. Celles que l'on a eu et celles que l'on aura. Merci à Laurianne pour tes encouragements et ta sagesse. Merci à ceux qui ont été là, de près ou de loin : Taha, Karim, Vincent, Julie et Perrine.

Merci à Sylvie et à Nordine. Merci pour vos conseils, votre accueil et votre soutien plus que précieux. Sylvie, un énorme merci pour avoir relu et corrigé si vite et si efficacement ce travail. Merci également pour votre présence sans faille. Je n'aurai pas choisi une différente belle-famille si j'en avais eu l'occasion.

Merci à ma famille. A Thomas, continu de croire en toi, je sais que tu peux le faire. A Amaury, merci pour les quelques heures de détente partagées par ci par là. Une respiration dans un océan déchainé. Merci à mon père, pour sa fierté et ses encouragements sans faille.

Enfin, merci à Rym, Merci d'être qui tu es. Merci d'être là quoiqu'il arrive. Merci pour tout ce que tu me m'as apporté, tout ce que tu m'apportes et tout ce que tu m'apporteras. Ces quelques mots étalés ici paraissent bien maigres pour exprimer ce que je ressens pour toi... Sans toi, rien n'aurait été possible. J'ai hâte de voir ce que l'avenir nous réserve. Prête pour l'aventure ?

À Nathalie
À Françoise
À Jacqueline

Dreams – Langston Hughes

*Hold fast to dreams
For if dreams die
Life is a broken-winged bird
That cannot fly.*

*Hold fast to dreams
For when dreams go
Life is a barren field
Frozen with snow.*

1 Introduction générale

1.1 Du constat du sur-risque des jeunes conducteurs au cours des premiers mois de la conduite...

L'accès à la conduite automobile autonome est une étape importante pour l'émancipation et l'indépendance de l'adolescent et du jeune adulte (S. M. Cox et al., 2015). Cette étape a un coût, les accidents de la route sont la première cause mondiale de mortalité accidentelle des 15-24 ans (World Health Organization, 2015). Dans les pays développés, les jeunes conducteurs sont 3 à 4 fois plus susceptibles d'avoir un accident mortel que les conducteurs plus âgés (McCartt, Shabanova, & Leaf, 2003; ONISR, 2017; UK Department For Transport, 2015). Ainsi, en France, en 2016, ils représentaient 8% de la population totale, mais étaient impliqués dans 23% des accidents de la route (ONISR, 2017). La littérature met en avant deux facteurs liés aux individus et associés à ce sur-risque : le jeune âge et l'inexpérience de conduite (A. E. Curry, Pfeiffer, Durbin, & Elliott, 2015; Massie, Campbell, & Williams, 1995; McCartt et al., 2003; ONISR, 2017; Roman, Poulter, Barker, McKenna, & Rowe, 2015; Williams & Carsten, 1989)¹.

Le facteur âge désigne ici le fait que l'immaturation neurocognitive et émotionnelle des jeunes conducteurs tend à accroître les tendances à la prise de risques et aux violations du code de la route (Chein, Albert, O'Brien, Uckert, & Steinberg, 2011; Keating, 2007; Reyna & Farley, 2006; Steinberg, 2007). D'un point de vue neurodéveloppemental, la maturation corticale ne s'achève pas avant l'âge de 25 ans et toutes les régions cérébrales ne se développent pas au même rythme (Casey, Getz, & Galvan, 2008). À l'adolescence, il existe ainsi une hyperactivité des régions responsables de la sensibilité à la récompense et de la recherche de sensation (Duell et al., 2016; Romer, Reyna, & Satterthwaite, 2017; Wahlstrom, Collins, & White, 2010). Dans le cadre de la conduite, cette caractéristique est associée à davantage de risques d'accidents (Chein et al., 2011; Guo et al., 2013), d'autant qu'elle ne peut être compensée par le système responsable du contrôle cognitif inhibiteur, encore immature à ce stade (Casey et al., 2008; Romer et al., 2017). Jusqu'au milieu des années 2000, les effets du jeune âge et des comportements à risques associés étaient ainsi considérés comme prépondérants pour expliquer la sur-accidentalité des jeunes conducteurs. Toutefois, une analyse de 2000 accidents auto-rapportés par des conducteurs âgés de moins de 20 ans, relativise fortement ce point de vue (McKnight & McKnight, 2003). En effet, elle montre que près de 42% des accidents sont dus à des déficiences des comportements de recherche visuelle (ex. observation latérale en intersection), 30% à des déficiences de prises de décision (ex. vitesse inadaptée) et 23% à des déficiences attentionnelles (ex. maintien de l'attention). Les auteurs en concluent que « l'immense majorité des accidents non mortels semblent résulter de défaillances des compétences de conduite et d'échecs pour reconnaître les dangers routiers, plutôt que de prises de risques volontaires » (McKnight & McKnight, 2003, p.924). Depuis, ces défaillances des compétences de perception, de compréhension, d'anticipation et de prise de décision ont été largement confirmées comme les principales responsables du sur-risque des jeunes conducteurs (Braitman, Kirley, McCartt, & Chaudhary, 2008; McDonald, Curry, Kandadai, Sommers, & Winston, 2014; Seacrist et al., 2018).

Cette importance des défaillances des compétences a amené certains chercheurs à s'intéresser à l'expérience de conduite comme facteur explicatif du sur-risque des jeunes conducteurs. Ces derniers sont en effet souvent des conducteurs novices et donc inexpérimentés (Roman et al., 2015). La majeure partie des conducteurs commence à conduire durant une

¹ Le format de citation utilisé dans ce travail est le format officiel de l'APA, 6^{ème} édition. Ce dernier inclut les initiales des auteurs en cas d'homonymie, pour éviter toute confusion.

période allant de 18 à 24 ans. Or, une corrélation est observée entre l'accumulation d'expérience de conduite et la réduction du risque d'accident de la route. En particulier, le sur-risque décroît fortement durant les 6 à 8 premiers mois de conduite en autonomie (voir figure 1 ; Gregersen et al., 2000; Mayhew, Simpson, & Pak, 2003; McCartt, Shabanova, & Leaf, 2003; Twisk & Stacey, 2007), les 1500 premiers kilomètres (voir figure 1 ; McCartt et al., 2003) ou après les 80 premières heures (Li, Guo, Klauer, & Simons-Morton, 2017). Un premier palier de sur-risque est dépassé la troisième année de conduite autonome, alors que le sur-risque continue à décroître progressivement jusqu'à 8 ans après l'obtention du permis (Government Queensland, 2005). Cet effet s'interprète alors comme la conséquence positive de l'accumulation d'expérience sur la propension des conducteurs novices à commettre des erreurs sur la route. (Fisher, Knodler, & Samuel, 2017; Higélé, Sieffer, & Hernja, 2011; McKnight & McKnight, 2003; B. G. Simons-Morton, Ehsani, Gershon, Klauer, & Dingus, 2017). La littérature suggère de plus que cet effet de l'expérience est indépendant de celui de l'âge. En effet, à âge égal, les conducteurs novices ont plus de risques d'avoir un accident de la route que les conducteurs plus expérimentés (Curry, Metzger, Williams, & Tefft, 2017; Mayhew, Simpson, & Singhal, 2005).

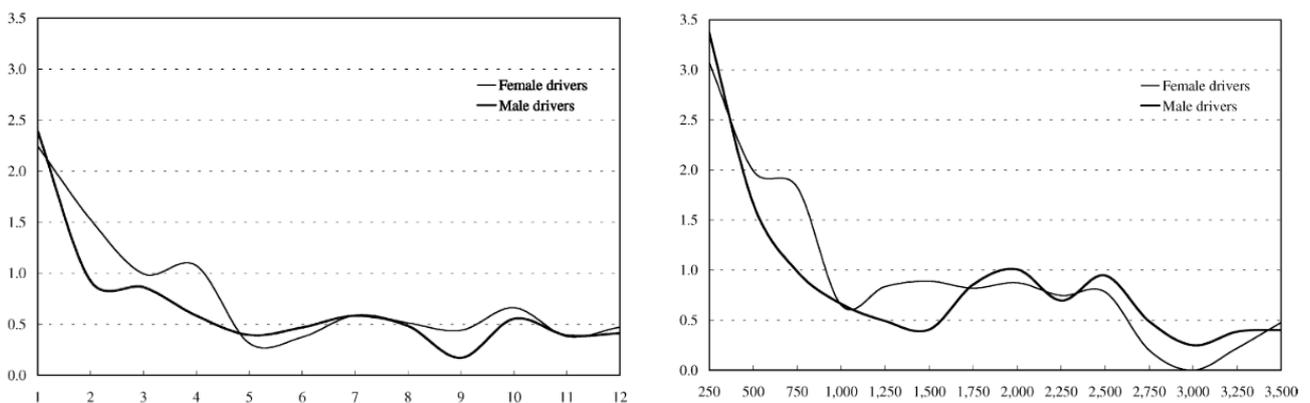


Figure 1, taux d'accidents (en nombre d'accidents par 10k miles parcourus) chez des conducteurs âgés de 16 à 18 ans, en fonction des mois de conduite accumulés (à gauche), et du nombre cumulé de miles parcourus (à droite) après l'obtention du permis – tiré de McCartt et al. (2003)

1.2 A la question des compétences de conduite de haut niveau et de leur développement au moyen de la réalité virtuelle

Ainsi durant leurs premiers mois en autonomie sur la route, les conducteurs novices acquièrent des habiletés fondamentales pour conduire efficacement et en sécurité. Identifier les compétences acquises « sur le tas » durant cette première période de conduite en autonomie et les situations dans lesquelles elles se développent constitue dès lors un enjeu central pour la sécurité routière (Hatakka, Keskinen, Gregersen, Glad, & Hernetkoski, 2002; McKnight & McKnight, 2003). Les compétences techniques liées à la manœuvre et au contrôle du véhicule étant réputées être acquises à l'issue de la formation initiale à la conduite et validées par l'examen du permis de conduire (Brehmer, 1994; Williams, 2013), il paraît raisonnable de s'intéresser aux compétences de conduite de plus haut niveau. Ces dernières concernent la maîtrise des situations de conduite (Hatakka et al., 2002) et incluent notamment des mécanismes d'évaluation de la situation routière et de son environnement (perception, compréhension et projection) ainsi que de prise de décision pour gérer les situations normales ou à risque. Ces compétences de haut niveau ont ainsi été définies comme l'ensemble des compétences perceptives, cognitives et d'auto-évaluation, ainsi que les ressources personnelles qui permettent au conducteur d'interagir de façon sûre et efficace avec l'environnement de conduite (Deery, 1999). Or, d'une part ces compétences de haut niveau apparaissent de loin les

plus impliquées dans l'accidentalité des conducteurs novices (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014), et d'autre part, elles sont les moins abordées dans la formation actuelle des jeunes conducteurs (Assailly, 2013, 2016b).

Une question complémentaire réside dans la conception de moyens pédagogiques qui pourraient faciliter l'acquisition de ces compétences perceptives et cognitives de conduite. Parmi les moyens émergents pour la formation, la réalité virtuelle, par le biais des simulateurs de conduite, peut constituer une alternative avantageuse à l'apprentissage de la conduite en situation réelle. Cette technologie permet de confronter de façon contrôlée les apprenants conducteurs à des situations de conduite variées, tout en supprimant les risques inhérents à l'environnement routier réel (Jelmer & Slob, 2008). Elle permet de plus, la mise en œuvre de techniques et de technologies de mesure généralement difficiles à utiliser en situation réelle (oculométrie, mesures comportementales fines, etc. ; Burkhardt et al., 2003).

Récemment, les travaux académiques comme industriels sur l'entraînement des compétences de conduite par le biais de simulateurs de conduite se sont ainsi multipliés (Beanland, Goode, Salmon, & Lennon, 2013; McDonald, Goodwin, Pradhan, Romoser, & Williams, 2015) et des outils et approches variés commencent à être proposés dans le commerce (ex. <http://thegooddrive.fr> ; <https://www.ediser.com>). Pourtant, il n'y a encore aujourd'hui que peu voire pas d'information sur les usages et l'utilisation réelle de ces outils. On constate par ailleurs un manque important de travaux et de données empiriques sur leur efficacité pour l'apprentissage et le développement des compétences de conduite (voir par exemple Hirsch & Bellavance, 2017; Klüver, Herrigel, Heinrich, Schöner, & Hecht, 2016), contrairement à d'autres domaines (ex. la simulation médicale ; Collange & McKenna, 2013; HAS, 2012). En outre, deux difficultés importantes doivent être soulignées.

La première difficulté concerne l'opérationnalisation de la mesure des compétences perceptives et cognitives sur simulateur. Les travaux existants utilisent des méthodologies diverses, qui ne sont pas toujours complètement efficaces. L'étude de Crundall et al., (2012) propose par exemple une évaluation sur la base d'indicateurs oculométriques (détection d'un danger dans une scène routière), et comportementaux (ralentissement de la vitesse à l'approche du lieu de danger potentiel). Sur ces deux indicateurs, les résultats montrent une supériorité des conducteurs expérimentés sur les novices. Ils détectent plus de danger, et ralentissent plus à l'approche d'un danger potentiel. Toutefois, les auteurs indiquent être dans l'incapacité de déterminer quelles compétences précises ont été utilisées pour neutraliser le danger dans la situation proposée. Par conséquent, il est souhaitable d'établir des méthodes de mesure qui puissent établir un diagnostic précis des compétences perceptives et cognitives des conducteurs prenant en compte les caractéristiques de la situation et de son évolution au cours de la simulation.

La seconde difficulté provient de l'absence relative de cadre pour guider la conception vers des configurations (« jeu » sur ordinateur, casque immersif, simulateur sur table, simulateur haute-fidélité) et des rétroactions (erreurs, correction, explication) plus efficaces visant à favoriser le développement des compétences perceptives et cognitives lors d'un entraînement sur simulateur. Les systèmes existants sont hétérogènes de ce point de vue, rendant d'autant plus difficile l'établissement d'une comparaison entre les quelques études publiées. Les modalités pédagogiques accompagnant l'utilisation du simulateur restent également en grande partie à élaborer.

1.3 Présentation de la thèse

1.3.1 Objectifs

Cette thèse a par conséquent pour objectif général de contribuer aux connaissances sur les compétences de conduite de haut niveau acquises lors des premiers mois de la conduite en autonomie, et sur l'utilisation des nouveaux outils de réalité virtuelle et de simulation pour l'évaluation et l'acquisition de ces compétences par les conducteurs novices.

Sur un versant théorique, il s'agira de contribuer à la compréhension des mécanismes d'apprentissage et de développement des compétences de conduite de haut niveau, durant les premiers mois de conduite autonome. Pour des raisons de faisabilité temporelle, l'éventail entier des compétences de conduite de haut niveau n'est pas considéré. Nous nous restreindrons au sous-ensemble des compétences perceptives et cognitives. En effet, des défaillances de ces dernières sont le facteur le plus souvent impliqué dans l'accidentalité des conducteurs novices (Deery, 1999; McKnight & McKnight, 2003). Par ailleurs, elles sont maîtrisées tardivement par rapport aux compétences techniques de contrôle du véhicule (Brehmer, 1994; Williams, 2013).

Sur un versant applicatif, nous avons comme objectif d'outiller la conception d'outils et de formation avec la réalité virtuelle mesurer et développer les compétences de conduite de haut niveau. Ainsi des recommandations pour le développement de protocoles d'entraînement en simulateur de conduite, destinés à ces compétences, pourront également être proposées.

1.3.2 Plan

La thèse s'articule en trois parties comprenant 11 chapitres.

La première partie, composée de 5 chapitres, expose le cadre théorique de la thèse et aboutit sur l'exposition de notre problématique de recherche.

Le chapitre 2 décrit l'activité de conduite et les compétences nécessaires pour la maîtriser efficacement en toute sécurité. Puis, nous exposons les mécanismes d'apprentissage des compétences de conduite, avant de décrire les avantages que la réalité virtuelle propose pour en favoriser le développement.

Le chapitre 3 décrit précisément les compétences de conduite de haut niveau, notamment perceptives et cognitives, qui sont les principales concernées dans le sur-risque des conducteurs novices.

Le chapitre 4 examine les travaux sur l'apprentissage des compétences perceptives cognitives en simulateur de conduite. Nous commençons par un état des lieux sur l'utilisation actuelle du simulateur pour la formation des compétences. Puis, nous recensons les différentes modalités de rétroactions formatives utilisées, pour favoriser l'apprentissage de ces compétences en simulateur de conduite. Nous insistons sur les limites des approches présentées et concluons sur des perspectives d'amélioration des programmes de formation.

Le chapitre 5, présente les pratiques actuelles pour mesurer les compétences de conduite de haut niveau perceptives et cognitives, tant en termes de protocoles, que de situations et d'indicateurs utilisés. Nous détaillons leur utilisation en simulateur de conduite, leurs limites, et proposons plusieurs perspectives visant à l'amélioration de l'évaluation des compétences perceptives et cognitives.

Le chapitre 6 expose la problématique de la thèse, à savoir la conception de situations simulées pour favoriser l'apprentissage et le développement des compétences de conduite de haut niveau perceptives et cognitives chez les conducteurs novices au moyen de la réalité virtuelle. Elle se décline en trois sous-objectifs : (1) l'identification

des caractéristiques des situations réelles impliquées dans l'acquisition des compétences de conduite de haut niveau, (2) l'élaboration et l'évaluation de situations et indicateurs associés pour mesurer les compétences perceptives et cognitives, en réalité virtuelle, et (3) la mise en place et l'évaluation de deux modalités de rétroaction formative en réalité virtuelle.

La seconde partie est composée de 3 chapitres exposant chacun une étude empirique.

Le chapitre 7 expose une étude exploratoire menée auprès de 48 conducteurs novices au moyen de la technique des Incidents Critiques (Butterfield, 2005; Flanagan, 1954). L'objectif est d'identifier les caractéristiques des situations réelles durant lesquelles les compétences de conduite de haut niveau sont mises en œuvre et pourraient être acquises durant les premiers temps de la conduite.

Le chapitre 8, sur la base des relations identifiées entre les situations et les apprentissages, présente une étude sur simulateur pleine échelle contrastant 20 conducteurs novices et 24 conducteurs expérimentés, afin de déterminer des indicateurs fiables pour mesurer les compétences de conduite perceptives et cognitives. Les situations et compétences associées portent sur l'anticipation et la gestion de 2 types de situations contenant un danger : ouverte (danger visible) et couverte (danger caché). Les indicateurs combinent des comportements oculomoteurs (ex. détection du danger) et des comportements de conduite (ex. freinages). Ces indicateurs permettent d'identifier des processus de prise de décision anticipatoire peu observés, enrichissant de ce fait les modèles existants.

Le chapitre 9 présente une étude menée auprès de 72 conducteurs novices visant à évaluer un protocole d'apprentissage des compétences perceptives et cognitives en simulateur pleine échelle. Nous comparons deux types de rétroactions en simulateur de conduite destinés à accélérer l'acquisition des compétences de conduite de perceptives et cognitives.

Dans la troisième partie, le chapitre 10 discute nos résultats au regard de nos objectifs et de la littérature. Le chapitre 11 expose les limites de ce travail et propose une série de perspectives et de recommandations pour de futur travaux. Puis, il conclue sur les implications de ces résultats pour l'apprentissage des compétences de conduite de haut niveau des conducteurs novices.

1.3.3 Contexte : le projet MacCoy Critical

Cette recherche a été réalisée à l'IFSTTAR au sein du laboratoire de Psychologie des Comportements et des mobilités (LPC) et financée par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du projet MacCoy Critical ([ANR-14-CE24-0021](#))². Ce projet vise à étudier et à améliorer les dispositifs de formation utilisant la simulation et les environnements virtuels dans deux domaines à forts enjeux en termes de santé publique et de sécurité : la médecine (anesthésie, gynécologie obstétrique) et la conduite automobile (conducteurs novices).

Le projet Mac Coy Critical se focalise sur les compétences cognitives de haut niveau (souvent désignées par la terminologie « compétences non techniques » dans d'autres domaines que la conduite, notamment la médecine et l'aéronautique) et s'intéresse à leur mise en œuvre dans les situations critiques rencontrées par ces deux populations d'apprenants. Les objectifs du projet s'inscrivent dans un contexte pluridisciplinaire de développement de connaissances

²(Burkhardt, Corneloup, et al., 2016) ; <https://maccoy.hds.utc.fr/>

et d'outils concernant tant les activités et les compétences impliquées que les technologies de réalité virtuelle et de simulation mobilisées.

Cette thèse s'inscrit dans le volet du projet portant sur les compétences de haut niveau de conduite et leur acquisition par les conducteurs novices au cours des premiers mois de conduite. Sur le plan applicatif, ce travail vise à enrichir la conceptualisation au sein du projet tant au travers des interactions avec le volet médical qu'avec le volet des technologies d'apprentissage.

Première partie : Cadre Théorique

2 Apprendre à conduire, quels apports de la réalité virtuelle pour la formation des compétences ?

2.1 La conduite, quelle activité ?

2.1.1 Conduire, contrôler son déplacement au sein d'un environnement dynamique

La conduite peut être analysée comme une activité de contrôle d'un déplacement, ayant pour objectif d'effectuer un trajet d'un point A à un point B, dans un environnement qui est à la fois mouvant, partagé et dont l'évolution est parfois incertaine (Neboit, 1978; Wilde, 1976). Cet environnement est dynamique au sens où le conducteur n'est pas le seul initiateur des changements qui s'y produisent (Hoc & Amalberti, 2005). En ce sens, Boccara (2011, p.11-12) ajoute que « la dynamique des situations de conduite n'est qu'en partie sous le contrôle proximal du conducteur : il peut agir directement sur la trajectoire de son véhicule et sa vitesse par l'intermédiaire des commandes [...] En revanche, il ne peut pas agir sur les évolutions de l'infrastructure (signalisation, nid de poule, etc.), des conditions météorologiques (pluies, grêle, etc.), du trafic routier et n'agit qu'indirectement sur les déplacements des autres usagers (clignotants, phares, klaxon) ». La conduite automobile est ainsi une activité complexe du fait de la « multiplicité des variables inhérentes aux situations de conduite ; grande diversité des usagers de la route, des véhicules, de l'infrastructure et des conditions de circulation » (Boccara, 2011 – p.11). Il s'agit pour le conducteur de contrôler en parallèle l'évolution de l'environnement, son déplacement et les effets de l'un sur l'autre. Cela l'amène à devoir mobiliser simultanément et de manière efficiente différentes compétences perceptives, motrices et cognitives (Peters & Nilsson, 2007).

2.1.2 Une hiérarchie de tâches multiples

Conduire de façon efficace, c'est-à-dire pour atteindre son but en toute sécurité requiert la réalisation simultanée de plusieurs tâches (Hoc & Amalberti, 2005). Dans une série d'études menées au début des années 70, McKnight et al. recensent ainsi près de 45 tâches distinctes, composées d'un total de près de 1700 sous-tâches uniques nécessaires au contrôle de ce déplacement dans l'environnement (Mcknight & Adams, 1970; Mcknight & Hundt, 1971, dans Michon, 1985). Parmi ces 45 tâches, certaines sont plus simples (i.e. qui comprennent peu de sous tâches) telles que démarrer, accélérer, tourner ; d'autres plus complexes (i.e. qui comprennent un grand nombre de sous tâches), telles que « dépasser », « naviguer », ou « surveiller ».

2.1.3 Une activité décomposable selon trois niveaux stratégique, tactique et opérationnel

Pour de nombreux auteurs à la suite de Michon (Michon, 1985), les tâches de conduite – et l'activité associée – se répartissent selon trois niveaux de performances comportementales. Ces niveaux de performances sont hiérarchisés du plus contrôlé au plus automatique, du plus cognitif au plus sensorimoteur, et s'inscrivent également dans un empan temporel allant du plus long au plus court (voir figure 2, adaptée de Michon, 1985). La hiérarchisation implique que les performances des niveaux élevés se repercutent sur les performances des niveaux plus bas.

Les tâches reposant sur la mise en œuvre de compétences fortement automatisées sont peu coûteuses en termes de ressources cognitives. Elles peuvent ainsi être réalisées en parallèle d'autres tâches, notamment contrôlées (Amalberti, 1996; Leplat, 2005; Van Merriënboer & Sweller, 2005). Les tâches requérant un fort contrôle cognitif sont à l'inverse coûteuses, deux tâches contrôlées concurrentes ne pourront être effectuées simultanément sans dégradation de la performance (Van Merriënboer & Sweller, 2005). Par ailleurs, chaque niveau de performance communique avec les niveaux immédiatement à proximité, par des boucles de rétroaction

sensorielles et cognitives (Allen, Lunenfeld, & Alexander, 1971; Boccara, 2011; Hatakka et al., 2002; Michon, 1985; Rasmussen, 1983; Verster & Roth, 2012).

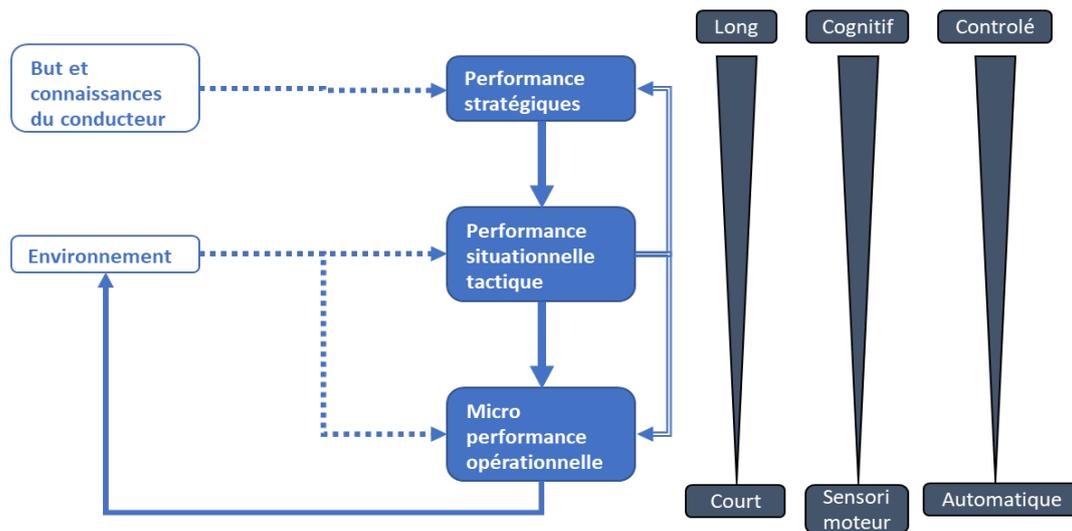


Figure 2, modèle hiérarchique de l'activité de conduite adapté de Michon (1985). À droite, caractérisation de la performance à l'aide des trois continuums des caractéristiques temporelles, cognitives / sensori-motrice et du degré d'automatisation

Le niveau **stratégique** renvoie aux macro-performances incluant la planification de l'itinéraire, ainsi que l'évaluation des coûts et des risques attenants à chaque trajet. Elles sont dirigées par les buts et les connaissances du conducteur et effectuées sous contrôle cognitif constant. Elles s'inscrivent dans une durée allant de plusieurs dizaines de secondes à plusieurs heures. Par exemple, il s'agit de la planification d'un trajet pour aller sur un nouveau lieu et de la recherche d'information en vue de déterminer l'itinéraire optimal.

Le niveau situationnel **tactique** regroupe les suites d'actions complexes visant à agir sur la situation de conduite tout au long de la réalisation de l'itinéraire. Il inclut des actions nécessaires à la sécurité de la conduite, à son efficacité et à la tâche de navigation, c'est-à-dire à la réalisation de l'itinéraire planifié (ex. éviter un obstacle, dépasser, s'insérer). Ces comportements peuvent être ou non automatisés, en fonction de l'expérience du conducteur. C'est un niveau intégratif car il met en relation les éléments de l'environnement perçus par le conducteur avec ses buts et actions sur cet environnement, dans l'objectif d'efficacité et de sécurité de la conduite.

Le niveau **opérationnel**, renvoie aux actions de contrôle du véhicule (ex. tourner le volant, appuyer sur la pédale) et donc en action directe sur l'environnement. Il correspond aux habiletés fortement automatisées et peu consommatrices en ressources cognitives pour un conducteur ayant obtenu son permis de conduire (Brehmer, 1994; Williams, 2013). Par exemple, la manœuvre qui permet au conducteur de se garer à son point de rendez-vous dépend, elle du niveau opérationnel.

2.2 Les compétences de conduite

2.2.1 Compétences, connaissances et performance

Le terme de compétence désigne de façon générale les « savoirs et savoir-faire à maîtriser pour atteindre l'objectif fixé » (Falzon, Weill-Fassina & Pastré, 2014, p.213). Dans une perspective cognitiviste, la compétence constitue un système acquis de connaissances, sous

la forme de structures mentales, qui permet d'engendrer l'activité, c'est-à-dire à l'opérateur de réaliser sa tâche (Leplat & Montmollin (de), 2001). Cette définition est précisée par Falzon, Weill-Fassina & Pastré (2014), qui considèrent les compétences comme « constituées de connaissances déclaratives et procédurales verbalisables, de savoir-faire plus ou moins implicites et de méta connaissances permettant une réflexion sur les composantes précédentes » (Falzon, Weill-Fassina & Pastré, 2014, p.214). En ce sens, les auteurs précisent que « la notion de compétence est proche de la notion anglo-saxonne de *skill* ».

Les compétences comprennent deux composantes principales : cognitive et praxéologique (Wittorski, 1998). La composante cognitive comprend les savoirs et connaissances déclaratives concernant les règles (ex. le code de la route) et les procédures (ex. passer un vitesse) de l'activité (J. R. Anderson, 1983; Brehmer, 1994), des schémas de situations c'est-à-dire « la construction active [par] l'acteur du sens de la situation » (Wittorski, 1998 – p.4) et des méta-connaissances. La composante praxéologique correspond à la performance de l'individu. C'est pour cette raison que « la performance [est] elle-même [...] parfois mesurée/évaluée au titre de la compétence » (Wittorski, 1998 - p2). La composante praxéologique est constituée des savoir-faire et des procédures motrices automatisées, stockés en mémoire procédurale (Hoareau, 2016; Leplat & Montmollin (de), 2001). Les procédures, désignent des séquences d'actions qui permettent la réalisation d'un but (Hoareau, 2016). La composante praxéologique implique alors pour la compétence d'être située, c'est-à-dire propre à un contexte particulier et indissociable de son objectif (Leplat & Montmollin (de), 2001).

2.2.1.1 *Compétences, règles, connaissances*

Le modèle *Skill Rules Knowledge* (SRK) de Rasmussen (1983) est un des premiers à mettre en lumière l'importance des connaissances dans l'expression du comportement. Il vise notamment à décrire les « différences entre les mécanismes cognitifs mis en œuvre par le néophyte, l'apprenti ou l'expert » lors de l'activité (Gicquel, 2004, p.1617, cité par Hoareau, 2016, p.33).

Au premier niveau, le comportement est basé sur les connaissances (*Knowledge*). C'est le niveau du novice qui utilise ses savoirs déclaratifs, acquises à priori, pour produire un raisonnement qui permet l'action (Falzon, Weill-Fassina, & Pastré, 2014). Au second niveau, le comportement est basé sur des règles ou des procédures connues (*rules*). C'est un niveau intermédiaire qui nécessite des connaissances déclaratives et procédurales acquises par des expériences passées ou à priori. Le troisième niveau est celui des compétences (*skills*). C'est le niveau des experts qui ne font plus appel à leur connaissances déclaratives pour réaliser la tâche. Ces savoir-faire consistent alors en des procédures parfois complexes, fortement automatisées.

Rasmussen suggère que la distinction entre le niveau des compétences (*skills*) et le niveau des règles (*rules*) n'est pas aisée. En effet, l'automatisation peut concerner des actions simples ou des suites d'actions, en fonction de l'expérience de l'opérateur (Rasmussen, 1983; Van Merriënboer & Sweller, 2005). Cette complexité est cohérente avec la nature des compétences nécessaires dans l'activité de conduite (maîtrise de procédures motrices complexes et connaissances des schémas de situation). En effet, en conduite, les mêmes situations ne se reproduisent jamais exactement (Mcknight & Adams, 1970). Elles possèdent ainsi une nature complexe qui empêche les opérateurs, même très expérimentés de fonctionner constamment au niveau des *skills*.

2.2.1.2 *Compétences, compétences techniques et non techniques, compétences de haut niveau*

La littérature distingue deux types de compétences. Les compétences techniques correspondent aux savoirs et savoir-faire technico-procéduraux nécessaires à la manipulation du véhicule et de ses dispositifs (Assailly et al., 2016). Il peut s'agir des procédures fortement

automatisées de démarrage, de direction de la trajectoire, de manipulation de la boîte de vitesse qui permettent le contrôle du véhicule.

Par opposition, les compétences non techniques sont définies comme « une combinaison de savoirs cognitifs, sociaux, et de ressources personnelles complémentaires des savoir-faire procéduraux qui contribuent à une performance efficiente et sûre » (Flin et al., 2008 – p .1). Pour ces auteurs, elles comprennent les compétences d'évaluation de la situation, de prise de décision, de communication, de travail d'équipe, de leadership, de gestion du stress et de gestion de la fatigue. Flin et Maran, (2015) différencient les compétences non-techniques individuelles, et les compétences d'équipe.

A notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature scientifique rapportée aux compétences de conduite de mention directe de la notion de compétence non-technique (Barré, Benabbou, Bourrier, Corneloup, & Job, 2017). Dans le cadre de la conduite, majoritairement solitaire et autonome, la question des compétences non-techniques individuelles est ainsi abordée sous le terme de compétences de conduite de haut niveau (Deery, 1999; Williams, McCartt, Mayhew, & Watson, 2013). Les compétences de conduite de haut niveau désignent un ensemble complexe et composite de savoirs et savoir-faire perceptifs, cognitifs, interpersonnels et intrapersonnels qui soutiennent le contrôle opérationnel du véhicule et qui sont nécessaires à l'interaction sûre et efficace avec l'environnement routier (Deery, 1999; Hatakka et al., 2002). Elles ont pour rôle principal d'éviter au conducteur de commettre des erreurs et de garantir l'efficacité et la sécurité de la tâche de navigation en conduite. Ces dernières comprennent les compétences perceptives et cognitives et les compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles et du contexte de la conduite (Assailly et al., 2016; Crundall, 2016; Deery, 1999).

2.2.2 Un référentiel général des compétences de conduite, la matrice GDE

Depuis la fin des années 90, la matrice GDE (*Goals for Driving Education*, voir tableau 1 ; Hatakka et al., 2002) constitue le principal cadre de réflexion et le modèle de référence européen concernant les compétences à maîtriser pour une conduite sûre et efficace (Boccaro, 2011; Hatakka et al., 2002; Siegrist et al., 1999). Elle peut être conçue comme un référentiel de compétences proposant une structure, un guide, pour l'organisation de la formation des apprenants et l'organisation de projets de recherche (Assailly, 2016 ; Boccaro, 2011).

Tableau 1, Matrice Goals for Driver's Education (GDE), adaptée de Hatakka et al. (2002), Assailly (2016, 2013)

Compétences / Axes	Compétences pour la maîtrise des Situations normales	Compétences pour la maîtrise des Situations et facteurs de risques	Compétences d'autoévaluation
Pressions sociétales et économiques <u>Niveau 5</u>	<ul style="list-style-type: none"> Résister aux influences des médias Résister aux influences des lobbies 	<ul style="list-style-type: none"> Résister aux influences de la publicité Résister aux influences des stéréotypes 	<ul style="list-style-type: none"> Auto-évaluer sa sensibilité personnelle à ces influences
Objectifs existentiels et contrôle de soi <u>Niveau 4</u>	<ul style="list-style-type: none"> Maîtriser son style de vie Maîtriser ses motivations 	<ul style="list-style-type: none"> Contrôler ses tendances à la prise de risque Résister aux pressions sociales distales 	<ul style="list-style-type: none"> Auto-évaluer ses compétences de contrôle de soi Auto-évaluer ses tendances au risque
Objectifs et contexte de conduite <u>Niveau 3</u>	<ul style="list-style-type: none"> Choisir son mode de transport Planifier son itinéraire 	<ul style="list-style-type: none"> Gérer ses états délétères (fatigue, stress) Résister aux pressions sociales proximale 	<ul style="list-style-type: none"> Auto-évaluer ses compétences pour gérer le contexte de la conduite
Compréhension et maîtrise des scénarii routiers <u>Niveau 2</u>	<ul style="list-style-type: none"> Percevoir les dangers Anticiper les situations 	<ul style="list-style-type: none"> Mauvaise anticipation Comportement erratique d'un autre usager Trop plein d'informations 	<ul style="list-style-type: none"> Auto-évaluer ses compétences pour gérer les situations dangereuses
Maitrise des manœuvres, du véhicule <u>Niveau 1</u>	<ul style="list-style-type: none"> Connaître les distances sécurités Contrôler son véhicule 	<ul style="list-style-type: none"> Maîtriser les conditions de conduite difficiles 	<ul style="list-style-type: none"> Auto-évaluer ses compétences de maitrise du véhicule

La matrice emprunte aux travaux de Michon (1985) pour proposer une approche hiérarchisée des compétences de conduite. Dans ce cadre, la hiérarchisation implique que « les pressions cybernétiques des [compétences des] niveaux supérieurs produisent des contraintes d'organisation sur les [compétences des] niveaux inférieurs » (Assailly, 2013, p.4). Ainsi, le succès ou la défaillance à un niveau élevé de la matrice augmente le succès ou la probabilité de défaillance aux niveaux plus bas.

Ce référentiel souligne également la dimension psycho-sociale à l'activité de conduite, à travers l'importance des compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles. Ainsi, l'application des principes de la matrice a contribué à la mise en place d'un module concernant les compétences d'auto-évaluation dans l'examen du permis de conduire de plusieurs pays nordiques (Suède, Finlande, Danemark ; Mynttinen, Sundström, Koivukoski, et al., 2009; Mynttinen, Sundström, Vissers, et al., 2009).

2.2.2.1 Cinq niveaux de compétences à maîtriser pour conduire efficacement et en toute sécurité

Les niveaux 1, 2 et 3 de la matrice renvoient aux compétences opérationnelles et tactiques nécessaires pour maîtriser la situation de conduite du point de vue du contrôle du

véhicule, de la maîtrise de la situation et de la gestion du contexte immédiat de la conduite. Ce sont les niveaux de compétences dont les défaillances sont les plus souvent retrouvées dans les accidents de la route des conducteurs novices (Braitman et al., 2008; A. E. Curry et al., 2017; Deery, 1999; Seacrist et al., 2018).

Le premier niveau de compétence concerne la maîtrise opérationnelle du véhicule et regroupe les habiletés sensori-motrices et procédurales nécessaires aux manœuvres en conduite. Ce niveau est le plus rapidement maîtrisé par les conducteurs (Assailly, 2016b; Brehmer, 1994). Le second niveau concerne la maîtrise tactique des situations routières. Il concerne la réalisation d'actions complexes et souvent contrôlées, pour adapter son comportement aux changements rapides des scénarios routiers, et réaliser ses objectifs en termes de navigation. Il inclut notamment les compétences d'évaluation de la situation, composée des compétences de perception, de compréhension et de projection de l'état futur du système, et les compétences de prise de décision. Il permet notamment d'anticiper les situations de conduite et les dangers routiers. Ce niveau est le plus souvent impliqués dans la sur-accidentalité des conducteurs novices (McKnight & McKnight, 2003). Le troisième niveau de la matrice est stratégique, il regroupe la planification de l'itinéraire et la gestion du contexte social et personnel de la conduite (ex. présence de passagers, niveau de fatigue préalable).

Les niveaux 4 et 5 renvoient aux buts, objectifs et motivations personnels du conducteur. Le quatrième niveau concerne ainsi l'évaluation et la gestion des objectifs existentiels et le contrôle de soi. Il introduit les facteurs motivationnels et les objectifs personnels comme des déterminants du comportement (Siegrist et al., 1999). Ce niveau regroupe les « connaissances sur ses propres tendances à augmenter les facteurs de risques en conduite automobile » (Boccaro, 201, p25). Enfin, le dernier niveau concerne l'évaluation et la gestion des « pressions sociétales et économiques » sur le comportement du conducteur (Assailly, 2013). Ce niveau regroupe les compétences de gestion de ses propres sensibilités à ces pressions, et leur tendance à augmenter les facteurs de risque en conduite automobile.

2.2.2.2 Des compétences organisées selon trois classes de situations à maîtriser

Les compétences se déploient au regard des exigences propres de la situation (Leplat & Montmollin (de), 2001; Wittorski, 1998). La matrice GDE définit ainsi trois classes croisant les cinq niveaux de hiérarchie des compétences : les compétences relatives aux situations « normales », les compétences relatives aux situations où existe un danger et les compétences d'auto-évaluation.

La première classe concerne les compétences nécessaires aux tâches de navigation en situation de trafic normal. Ces compétences doivent être maîtrisées à l'ensemble des 5 niveaux. Le conducteur doit en effet correctement planifier son trajet, en tenant compte des influences psycho-sociales qu'il subit. Il doit réaliser son itinéraire grâce à sa maîtrise des situations de conduite (ex. repérer les indications, diriger son véhicule en conséquence). Il réalise ces tâches par l'exercice de ses compétences techniques de contrôle du véhicule.

La seconde classe concerne les compétences nécessaires à la reconnaissance et à la gestion des situations dangereuses. Les facteurs de risque peuvent être de deux types : situationnels et internes. Les facteurs de risque situationnels sont directement liés à la situation de conduite et concernent ainsi les trois premiers niveaux de la matrice. Ils incluent les risques associés à une mauvaise maîtrise de la situation par (ex. danger non perçu, mauvaise anticipation), et les risques issus de la situation de conduite elle-même et de son impact sur le conducteur (ex. un autre véhicule fait une queue de poisson au conducteur, route de montagne verglacée ; Crundall, 2016; McDonald et al., 2014). Un risque situationnel supplémentaire est lié à la pression sociale interne au véhicule. Notamment, il s'agit de l'influence négative que les passagers peuvent exercer sur les tendances à la prise de risque du conducteur (J. P. Allen

& Brown, 2008; Chein et al., 2011; A. E. Curry, Mirman, Kallan, Winston, & Durbin, 2012; Shepherd, Lane, Tapscott, & Gentile, 2011; B. G. Simons-Morton et al., 2011). Les facteurs de risques internes ne sont pas directement liés à l'activité de conduite et concernent de fait les niveaux 4 et 5 de la matrice. Ils désignent les traits de personnalité et les états physiques et mentaux du conducteur susceptibles d'augmenter le risque. En conduite il s'agit de traits de personnalité ou d'états tels que la recherche de sensation, l'anxiété et le stress, la colère au volant, la fatigue et la conduite sous influence (Dubois, Mullen, Weaver, & Bédard, 2015; Ge et al., 2014; Gulian, Matthews, Glendon, Davies, & Debney, 1989; Luk et al., 2016; Paterson & Dawson, 2016; Penning, Veldstra, Daamen, Olivier, & Verster, 2010; Scott-Parker, Watson, & King, 2009; Scott-Parker, Watson, King, & Hyde, 2013; Westerman & Haigney, 2000; Zhang, Chan, & Zhang, 2015).

Enfin, la troisième classe regroupe les compétences d'auto-évaluation de ses propres compétences par le conducteur, à chaque niveau de la matrice. Lorsqu'elle est liée à la maîtrise opérationnelle du véhicule, il s'agit par exemple pour le conducteur de savoir si il est capable de réaliser un démarrage en côte, ou de conduire sur route gelée par exemple (Gregersen, 1996; Katila, Keskinen, & Hatakka, 1996). L'auto-évaluation des compétences de maîtrise des situations concerne les savoirs du conducteur liés à ses capacités à conduire sur des situations dangereuses, nouvelles ou inhabituelles (ex. Conduite sous la pluie, conduite en agglomération dense). Enfin, l'auto-évaluation des trois derniers niveaux concerne les savoirs du conducteur concernant ses propres compétences de planification, de résistance aux pressions sociales et de contrôle de soi, lié à une personnalité à risque par exemple.

2.3 L'apprentissage de la conduite, entre formations et apprentissages autonomes

2.3.1 La formation à la conduite en France et dans le monde

La formation à la conduite vise à développer et à renforcer les compétences des conducteurs pour interagir de façon sûre, efficace et autonome avec l'environnement de conduite. Elle comprend l'étape de formation initiale à laquelle peut s'ajouter des formations supplémentaires ayant lieu avant ou après l'obtention du permis de conduire. Ces formations supplémentaires visent, le plus souvent, à renforcer des compétences spécifiques (ex. gestions des situations dangereuses, conduite sur route gelée, freinage d'urgence).

2.3.1.1 La formation initiale à la conduite.

Au-delà des multiples modalités de formation à la conduite, deux grandes orientations peuvent être distinguées : les formations théoriques et les formations pratiques.

En France, et dans la plupart des pays développés, **la formation théorique initiale**, concerne l'acquisition du code de la route et des connaissances sur les risques de la conduite. Elle est sanctionnée par un examen théorique (le « code de la route » en France), nécessaire pour l'obtention du permis de conduire définitif. Dans certains pays comme la France, l'Allemagne ou le Royaume-Uni, la formation théorique peut prendre la forme d'un cours, à l'aide d'un support écrit, oral ou imagé selon une approche essentiellement expositive dans les premières étapes, pour évoluer vers plus d'interactivité au fil du cursus – sous la forme d'interactions entre l'apprenant et un logiciel spécialisé ou avec un enseignant. L'apprentissage théorique utilise des supports représentant des situations réelles de conduite, afin de favoriser l'exposition des apprenants conducteurs à des situations problématiques pour eux (McDonald et al., 2015). L'apprenant s'y entraîne à détecter des dangers, des risques et à répondre à des interrogations concernant les règles de la conduite (Pollatsek, Narayanaan, Pradhan, & Fisher, 2006; Pradhan, Fisher, & Pollatsek, 2006; Pradhan, Pollatsek, Knodler, & Fisher, 2009).

Dans les pays développés, **la formation pratique** se concentre en premier lieu sur l'acquisition des compétences techniques et procédurales de maîtrise du véhicule. Puis, elle

s'oriente progressivement vers l'acquisition des compétences de plus haut niveau, notamment liées à la maîtrise des situations (Assailly, 2013; Assailly et al., 2016). Cette formation pratique peut prendre trois formes : la conduite encadrée, dispensée par un professionnel de l'enseignement, la conduite accompagnée et la conduite graduée (Beanland et al., 2013; Boccara, 2011).

En France et dans la majorité des pays d'Europe (ex. Allemagne, Belgique, Suède, Danemark, Espagne), la formation pratique comprend uniquement les approches encadrée et accompagnée. Dans ces pays, les conducteurs ne sont généralement pas autorisés à conduire seuls avant l'âge de 18 ans et sans l'obtention du permis de conduire. Leur formation pratique commence par une phase de conduite encadrée. Dans la conduite encadrée, l'enseignant de la conduite dispense une leçon personnalisée à l'apprenant, au regard de l'avancée de sa formation et du diagnostic de compétences effectué avant ou pendant la leçon. Durant ces leçons de conduite, « l'apprentissage des élèves conducteurs s'effectue au moyen de situations didactiques que l'enseignant complexifie au fur et à mesure du développement des compétences de chaque élève. Pour complexifier les situations didactiques, l'enseignant peut placer les élèves dans des infrastructures plus complexes, indiquer l'itinéraire par les directions à suivre uniquement, mais aussi en modifiant son guidage verbal et ses interventions physiques » (Boccara, 2011, p.98-99). Au bout de 20 heures de formation pratique et après accord de la structure d'enseignement, l'apprenant peut poursuivre sa formation pratique en conduite accompagnée. En conduite accompagnée, l'apprenant accumule de l'expérience de conduite sous la supervision d'un conducteur plus expérimenté.

L'approche par accès gradué à la conduite, qui permet à des individus mineurs de conduire sans supervision mais dans un cadre bien défini, a notamment cours dans les pays anglo-saxon (ex. Royaume-Uni, Canada, Australie, Etats-Unis). Cette approche comprend trois phases (Shope, 2007). La première phase correspond à la formation encadrée et accompagnée dispensée dans la plupart des pays Européens. Durant la seconde phase, les apprenants, même mineurs, sont autorisés à conduire de façon indépendante, mais uniquement dans des conditions restreintes et peu risquées (pendant la journée, sur des trajets prédéfinis, avec moins de trois passagers, etc.). A la fin de cette seconde phase, les apprenant reçoivent un permis non restrictif les autorisant à conduire dans toutes les conditions.

Une enquête par questionnaire, menée auprès de plus de 750 novices suédois, montre que le permis de conduire est obtenu plus facilement lorsque la première et la dernière partie du cursus sont réalisées en conduite encadrée, avec une phase intermédiaire de conduite supervisée ou accompagnée (Nyberg, Gregersen, & Wiklund, 2007). Cependant, les travaux menés sur l'efficacité réelle des méthodes accompagnées sur le sur-risque d'accident des jeunes conducteurs montrent des résultats mitigés. Par exemple, des travaux récents montrent que les méthodes non encadrées peuvent accroître le sur-risque, si les accompagnateurs ou superviseurs présentent eux même des habitudes de conduite à risques (Taubman – Ben-Ari, Lotan, & Prato, 2017). La même incertitude demeure concernant la conduite graduée, dont les études évaluatives n'ont montré jusqu'à présent que des résultats non-concluants (Beanland et al., 2013).

2.3.1.2 Des formations supplémentaires, pour réduire le sur-risque des conducteurs

Dans un objectif de réduction du sur-risque des conducteurs novices, les pouvoirs publics ont récemment encouragé la création de formations supplémentaires, venant s'ajouter à la formation initiale. Ces programmes sont catégorisés en fonction du niveau de compétences auquel ils s'adressent.

Les formations aux compétences techniques se focalisent sur l'apprentissage sur route réelle de manœuvres de conduite avancées, non abordées durant la formation initiale (Brijs,

Cuenen, Brijs, Ruiter, & Wets, 2014; Williams, 2013). Par conséquent, ces formations adviennent majoritairement après l'obtention du permis de conduire (Beanland et al., 2013), et concernent des situations de conduite très spécifiques. Par exemple, les autorités des pays envahis par la neige, forment les conducteurs novices à la conduite sur route gelée (Jones, 1993; Katila et al., 1996). D'autres auteurs, Katila et al. (2004) ont évalué les effets de l'ajout d'un cours spécifique à la conduite sur route gelée en fin de cursus, sur l'accidentalité des conducteurs novices après l'obtention du permis. Si ce type de formation produit des conducteurs plus adroits pour manœuvrer leur véhicule, les résultats ne montrent pourtant aucun effet de réduction des accidents chez les conducteurs entraînés. En revanche, les conducteurs ayant reçu l'entraînement sont plus confiants en leurs capacités de conduite que les autres conducteurs. Or, la sur-confiance en conduite a été associée à davantage d'accidents du fait de comportements dans l'ensemble moins prudents (Assailly, 2013).

Les formations aux compétences de conduite de haut niveau constituent la majorité des formations supplémentaires les plus récentes (Beanland et al., 2013; McDonald et al., 2015). Elles se focalisent sur les compétences de maîtrise des situations contenant un danger selon deux approches, basées sur des technologies interactives : utilisation d'un logiciel interactif sur ordinateur et/ou exposition à des situations de conduite sur simulateur. Dans les formations supplémentaires par ordinateur, l'apprenant a typiquement pour tâche d'indiquer à l'aide des commandes de l'ordinateur les zones de danger éventuel dans l'environnement. Dans les formations supplémentaires sur simulateur, les configurations et les approches sont plus diverses et hétérogènes, ne serait-ce que parce que les simulateurs utilisés varient grandement en termes d'interaction offerte et de degré d'immersion – depuis le poste informatique associé à un joystick jusqu'au simulateur pleine échelle. Ces formations se basent néanmoins toutes sur le principe d'« exposition des conducteurs à de multiples scénarios dangereux, dans une période de temps restreinte, en comparaison du temps qui serait requis pour les rencontrer et en avoir l'expérience durant les premiers mois de la conduite après l'obtention du permis » (Wang et al., 2010, p.19). L'efficacité de ces formations à la conduite routière sur simulateur est encore mal connue, du fait du manque de données sur leur utilisation réelle ainsi que du faible nombre et de l'hétérogénéité des études visant à évaluer cette efficacité (Goode, Salmon, & Lenné, 2013; McDonald et al., 2015; Moreno-Roldán et al., 2018; Unverricht, Samuel, & Yamani, 2018).

2.3.2 Un apprentissage autonome post-permis des compétences de conduite de haut niveau : étapes et processus

Le développement et la maîtrise des compétences de conduite requiert une « quantité importante de pratique en autonomie de la conduite, dans des conditions réelles et durant une période de temps conséquente » (Williams, 2013, p.16). Peu de données existent sur ce qui est appris, et comment, lors des premiers temps de la conduite autonome.

L'apprentissage et le développement des compétences emprunte deux chemins (Falzon et al., 2014 - p.219). Un premier est dit « cognitif » et concerne l'acquisition de connaissances déclaratives et de schémas de situations. Un second est « opératif » ou praxéologique et concerne l'acquisition des procédures qui « organisent l'action » à réaliser. En conduite, les savoirs procéduraux de contrôle du véhicule sont acquis rapidement et validés par l'obtention du permis de conduire (Assailly, 2016a; Brehmer, 1994; Williams, 2013). Au contraire, les compétences de conduite de haut niveau sont maîtrisées plus tardivement par les novices que les compétences techniques de bas niveaux (Brehmer, 1994; Deery, 1999; Williams et al., 2013). Par ailleurs, les compétences de haut niveau sont peu présentes dans le cursus obligatoire, en comparaison des compétences de bas niveau (Assailly, 2013, 2016b). De ce fait, des défaillances des compétences de haut niveau sont le facteur le plus souvent impliqués dans le sur-risque des novices, bien avant les prises de risque délibérées (Braitman et al., 2008; Deery, 1999; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003).

Par conséquent, l'apprentissage de la conduite, après l'obtention du permis, concernerait principalement l'acquisition des compétences de haut niveau. Une question supplémentaire concerne alors les mécanismes d'apprentissage de ces compétences. En effet, lors de la formation, l'apprentissage est guidé soit par un formateur professionnel, soit par un autre conducteur expérimenté. Ce n'est pas le cas pour l'apprentissage post-permis, qui doit donc trouver des vecteurs différents pour se déployer. Cet apprentissage se ferait ainsi « par la pratique », possiblement par la rencontre de situations de conduite difficiles ou à risque (McKnight & McKnight, 2003; Williams, 2013).

2.3.2.1 Apprendre à conduire : automatiser et acquérir des schémas de situations

Brehmer, (1994), s'inspirant du modèle SRK (Skills, Rules, Knowledge) de Rasmussen (1983), décrit deux mécanismes principaux de l'apprentissage de la conduite : l'automatisation de procédures simples et complexes, et l'acquisition de connaissances sur les situations de conduite, sous la forme de schémas de situation.

L'automatisation de procédures simples, composées d'unités comportementales élémentaires concerne directement le contrôle effectif de la voiture (ex. passage de vitesse). Dans les premiers temps de l'apprentissage de la conduite, le conducteur apprenant doit penser à réaliser dans l'ordre toutes les unités de comportements nécessaires à la réalisation de son action. Au fil de la pratique et de la répétition, ces unités s'agglomèrent pour former une procédure complètement automatisée. Il s'agit ensuite d'automatiser plusieurs procédures simples pour réaliser un comportement complexe (ex. dépasser un conducteur trop lent).

Le second mécanisme correspond à l'acquisition de schémas de situations, par l'accumulation d'expériences de conduite. En effet, avec « l'accumulation d'expériences, les conducteurs apprennent également à adopter le bon comportement dans différentes situations de conduite » (Brehmer, 1994 - p546). Un schéma de situation correspond à une conceptualisation structurelle abstraite des caractéristiques d'une situation (Endsley, 1995b; Holyoak & Koh, 1987; Ivancic & Hesketh, 2000), associée aux procédures comportementales à appliquer pour la réalisation effective des buts, en sécurité (A. Y. Kolb & Kolb, 2012).

2.3.2.2 Un apprentissage par l'expérience concrète de situations de conduite

L'acquisition des schémas de situation par l'accumulation d'expériences, renvoie donc à un processus d'apprentissage par la pratique (Assailly, 2016b; Brehmer, 1994; Williams, 2013) par lequel les personnes apprennent en faisant sens de leur expérience (Bruce & Bloch, 2012). La théorie de l'apprentissage expérientiel en propose une vision dynamique et holistique (voir figure 3, tirée de Kolb & Kolb, 2012).

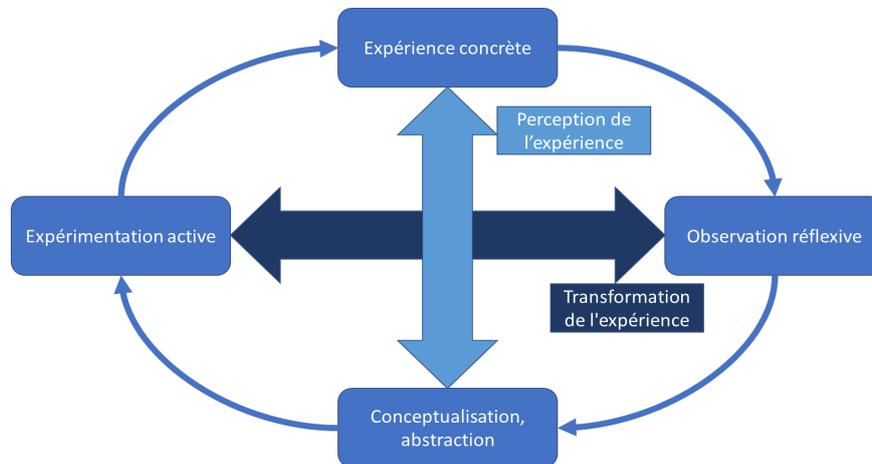


Figure 3, le cycle de l'apprentissage expérientiel. Tiré de Kolb & Kolb (2012)

L'apprentissage expérientiel désigne le « processus par lequel des savoirs et savoir-faire sont produits, par la transformation de l'expérience » (Kolb, 2014, p.41). Cet apprentissage est dynamique au sens où il repose sur un processus cyclique et récursif. Ainsi, les expériences concrètes servent de base de réflexion et d'observation à l'apprenant. Ces réflexions et observations sont alors transcrites et assimilées par l'apprenant sous la forme de schémas de situation abstraits. Ces schémas fournissent alors de nouveaux guides d'expérimentation à l'apprenant qui améliore alors ses performances dans la situation concrète (A. Y. Kolb & Kolb, 2009). Cet aspect cyclique est combiné à un mécanisme de « résolution de conflits entre plusieurs modes de relation au monde dialectiquement opposés » (Kolb & Kolb, 2012, p.1216). Ainsi, l'apprenant oscille constamment entre les modes d'action et de réflexion, et les modes d'expérimentation et d'abstraction. Il est alors « holistique » parce qu'il inclut de manière intégrative toutes les fonctions sensori-motrices et cognitives de l'apprenant : « penser, ressentir, percevoir et agir » (Kolb & Kolb, 2012, p.1216).

Un facteur d'efficacité majeure pour l'apprentissage expérientiel est que l'apprenant doit être responsable de ses actions durant toute la phase d'expérience concrète (Fede, Gorman, & Cimini, 2018; Morris, 2019). Par conséquent, ce modèle pourrait suggérer une piste d'explication de la diminution du sur-risque durant les premiers mois de conduite autonome (Mayhew, Simpson, & Pak, 2003; McCart et al., 2003). En effet, une telle diminution pourrait signaler un apprentissage « par la pratique » de la conduite autonome. L'expérience concrète de situations de conduite fournirait une base de réflexion à l'apprenant qui pourrait en extraire un schéma de situation. Sur la base de ce schéma, le conducteur serait alors plus à même de reconnaître et de maîtriser une situation de conduite ressemblante à l'avenir. Toutefois, les caractéristiques de l'apprentissage expérientiel des novices durant les premiers temps de la conduite autonome demeurent encore peu connues. Cependant, les principes de l'apprentissage expérientiel ont été largement repris par les formations en simulateur, qui exposent les conducteurs à des situations difficiles, parfois dangereuses et qui favorisent l'occurrence d'erreur (Beanland et al., 2013; Vlakveld et al., 2011; Wang, Zhang, & Salvendy, 2010). Une

question principale est alors celle des caractéristiques des situations qui favorisent le développement des compétences.

2.3.3 Situations critiques et apprentissage

Toutes les situations vécues – expérimentées – n’ont pas le même potentiel d’apprentissage (Vygotsky, 1978). Falzon et al., (2014, p.224) indiquent dans ce sens que « la compétence se construit non par une répétition des gestes et des actions, mais par la connaissance du résultat de l’action face aux obstacles pour atteindre le but. ». Dans le cadre de la conduite, les « obstacles » dont l’expérience déclenche l’apprentissage pourraient désigner des situations difficiles, risquées ou mal maîtrisées pour les novices. Cependant, les contours de telles situations restent encore flous.

Dans ce cadre, Burkhardt, Corneloup, et al., (2016) proposent la notion de situations critiques pour l’apprentissage. Ces situations auraient pour particularité de « dépasser les capacités du conducteur, [...] permettant ainsi l’occurrence d’apprentissages et fournissant les opportunités nécessaires au développement de nouvelles compétences » (Burkhardt et al., 2016, p.3). Notamment, elles fourniraient en la « connaissance du résultat de l’action » (Falzon et al., 2014, p.224), qui permet la prise conscience et la réflexion nécessaires à l’apprentissage de la compétence (D. A. Kolb & Kolb, 2012). Elles seraient alors critiques pour l’apprentissage des compétences car particulièrement représentatives des situations qui médiatisent leur développement (Butterfield, 2005; Flanagan, 1954).

Plusieurs dimensions modulent la criticité d’une situation pour l’apprentissage (voir tableau 2 ; Burkhardt et al., 2016). Ces dimensions prennent en compte l’influence des actions du conducteur sur son environnement (ex. les erreurs ; Ivancic & Hesketh, 2000), mais également l’ensemble des contraintes qu’exerce un environnement dynamique et partagé, sur le conducteur (Munduteguy & Ragot-Court, 2011; Wilde, 1976).

Tableau 2, dimensions de criticité des situations d'apprentissage

Dimensions	Définitions
Dilemme	Situations dans lesquelles un choix difficile doit être fait au sens où toutes les solutions possibles comportent des conséquences négatives
Ambiguïté	Situations dont l’identification est difficile à établir ou dont l’évolution est difficile à prévoir par la personne, car les informations disponibles y sont contradictoires ou peu accessibles
Charge socio-cognitive	Situations dans laquelle la charge de travail de la personne est influencée par des facteurs externes tels qu’une restriction temporelle pour effectuer la tâche, la pression sociale, la multiplicité des sous tâches à accomplir de manière simultanée
Rareté, nouveauté	Situations inhabituelles pour le conducteur, qui apparaissent peu souvent, ou qui n’ont pas encore été rencontrées
Sévérité	Situations pouvant potentiellement avoir des conséquences néfastes pour la santé du conducteur et celle des autres
Non-maîtrise	Situations pour lesquelles les compétences nécessaires sont indisponibles ou encore mal développées

Lors d’une situation critique, la connaissance du résultat de l’action consisterait alors en l’évaluation de son échec ou de sa réussite, au regard du but fixé. Dans le cadre de la conduite, l’échec de l’action, ou de la séquence d’action, est souvent associé à une erreur (Reason, Manstead, Stradling, Baxter, & Campbell, 1990). En effet, l’erreur est soit une action inadaptée, soit une absence d’action alors que celle-ci est requise dans une situation de conduite donnée, du point de vue de son efficacité ou de sa sécurité. Malgré leurs fortes implications dans le sur-risque des novices (Braitman et al., 2008; McCartt et al., 2003; McDonald et al., 2014), seule

une faible proportion des erreurs résultent en accident de la route (Seacrist et al., 2018). Dans ce cas, elles peuvent alors constituer des « événements saillants, qui peuvent motiver des apprentissages à propos d'une tâche » (Kulhavy, 1977, dans Ivancic & Hesketh, 2000, p.1967).

La connaissance du résultat de l'action peut également être issue d'une réussite de la séquence d'action, pour la réalisation du but. Dans le cadre de l'apprentissage par renforcement, les actions et prises de décisions qui engendrent une récompense, tendent à être répétées lorsqu'une situation similaire se présente (Izquierdo & Izquierdo, 2012; Thorndike, 1898). Les situations de conduite critiques étant par nature difficiles, leurs réussites pourraient déclencher chez le conducteur un renforcement, sous la forme d'un développement des compétences utilisées pour résoudre la situation, ainsi qu'un effet sur la confiance et sur la connaissance de ses propres compétences par le conducteur.

2.4 Apports de la réalité virtuelle et de la simulation pour la formation à la conduite

2.4.1 Réalité virtuelle et simulation pour la formation

L'éducation constitue une des approches principales de l'utilisation de la réalité virtuelle (Burkhardt, 2003). L'ambition de cette approche est « d'utiliser au mieux les ressources de la technologie informatique (réseau, graphisme et animation, son) pour offrir à l'apprenant un environnement d'apprentissage (inter-)actif » (Burkhardt et al., 2003, p.68-69). Fuchs (2010, p.10) définit la réalité virtuelle comme « un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel, le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. ».

Une dimension-clé de la réalité virtuelle « éducative » concerne sa fidélité au monde réel qu'elle peut chercher à reproduire (Burkhardt, 2003). Deux approches se distinguent: l'approche réaliste et l'approche psychologique ou comportementale (Grumbach & Klinger, 2007). L'objectif de l'approche « réaliste » est de reproduire le plus fidèlement possible la réalité du point de vue des sensations éprouvées par l'apprenant. L'approche psychologique met l'accent sur l'immersion de l'apprenant en insistant sur la simulation des « conditions d'un monde réel » (Grumbach et Klinger, 2007, p.1). Dans ce cadre, c'est l'interaction entre l'apprenant et le monde virtuel qui est mise en avant. Cela se traduit chez l'apprenant « par la mise en œuvre d'un grand nombre de ses « facultés » cognitives : perception, action, mémorisation, émotion, etc. » (Grumbach et Klinger, 2007, p.1).

Avec les progrès technologiques, la réalité virtuelle « éducative » recourt de plus en plus à l'usage de simulateurs. Un simulateur désigne un « dispositif électronique et informatique visant à reproduire certains objets ou aspects caractéristiques d'un environnement ou d'une situation de travail » (Burkhardt et al., 2003 - p56). Dans ce cadre, la simulation éducative désigne alors, « toute situation pédagogique ou des apprenants doivent tenir un rôle et agir en conséquence en ayant comme enjeux d'explorer, de progresser et de réussir. » (Burkhardt et al., 2003 - p55). L'utilisation de la simulation à base d'électronique et d'informatique pour la formation a été popularisée au 20ème siècle dans le domaine de l'aéronautique. Développée ensuite dans de nombreux domaines (marine, nucléaire, conduite, biomédical ; Cabon, Corneloup, Job, & Burkhardt, 2016), la simulation a été rapidement mise à profit pour la formation des opérateurs, dans des domaines où les risques étaient trop importants pour permettre un apprentissage par la pratique. L'aviation a été ainsi le premier domaine à imposer un enseignement sur simulateur à ses pilotes.

2.4.2 Potentialités de ces technologies pour la formation à la conduite

Burkhardt et al. (2003, p.56-57) recensent les apports et intérêts de la simulation et de la réalité virtuelle pour la formation. Ces apports peuvent être résumés en 3 grandes catégories : la mise en situation, l'évaluation et l'articulation des apprentissages (voir tableau 3). Ces apports sont notamment permis par les deux avantages principaux du simulateur : la flexibilité et la sécurité.

Tableau 3, apports de la sécurité et de la flexibilité des simulateurs de conduite pour l'apprentissage des compétences

Type d'apports	Exemples d'apport pour l'apprentissage de la conduite
Mise en situation	Exposition aux situations : <ul style="list-style-type: none">• Inaccessibles• Rares• Dangereuses• Coûteuses• Critiques pour l'apprentissage
Evaluation des compétences	Contrôle des paramètres de la situation de conduite : <ul style="list-style-type: none">• Terrains, climat• Introduction de dysfonctionnement, pannes, événements Outils de mesure des compétences : <ul style="list-style-type: none">• Comportement de conduite (erreurs, violations)• Oculométrie
Organisation des apprentissages	Action sur la situation <ul style="list-style-type: none">• Répétition des situations• Gel des situations• Messages textuels ou audio, indication de zones d'intérêt Segmentation des apprentissages <ul style="list-style-type: none">• Isolation des compétences• Exploitation des erreurs comme outil pédagogique

2.4.2.1 Des mises en situations et une évaluation des compétences facilitée

La simulation permet de mettre les apprenants en situation, « quand le terrain réel ne le permet pas [...] afin de permettre aux apprenants d'acquérir une certaine expérience et de développer des compétences en vue de l'activité future » (Burkhardt et al., 2003, p.56-57).

Du point de vue de la flexibilité, il permet alors au formateur de « contrôler précisément certains paramètres de la situation, les faire varier, voire les modifier à volonté ». Cet avantage se combine avec la possibilité de segmenter les apprentissages, notamment en sélectionnant des situations qui vont « isoler » les compétences de conduite identifiées comme manquantes chez l'apprenant. Une fois sélectionnée, la situation pourra alors être recommencée autant de fois que nécessaire.

Du point de vue de la sécurité, l'opérateur évolue dans un environnement virtuel qui, par définition, ne l'expose à aucun risque réel (Blana, 1996; Jelmer & Slob, 2008). Cette sécurité permet d'exposer le conducteur mêmes aux situations critiques pour l'apprentissage les plus dangereuses, sans risque réel.

La flexibilité du simulateur permet également aux enseignants de mesurer en direct et de façon précise, les performances des conducteurs, sur des paramètres difficilement accessibles en conduite réelle (courbe d'accélération, orientation du regard, temps de réaction au freinage lors de l'apparition d'un élément perturbateur).

2.4.2.2 *Mieux organiser les apprentissages pour favoriser l'acquisition des compétences*

La simulation permet de « Répéter la même situation de façon intra ou inter-individuelle » ; de « Simplifier et segmenter les apprentissages pour les faciliter » tout en donnant « à l'erreur un statut pédagogique, en permettant d'en faire observer les conséquences et en soutenant plusieurs façons de les expliquer » Burkhardt et al. (2003, p.56-57).

Cette facilitation des apprentissages passe également par la possibilité pour le formateur « d'intervenir à tout moment afin d'exploiter didactiquement le contexte et le comportement de l'apprenant : fonctions de gel de la situation (figer les états et la dynamique d'une situation-problème à un moment donné, par exemple pour poser des questions ou recevoir une explication avant de reprendre le cours de la session), de rejeu (par exemple en vue d'analyser les difficultés et les stratégies, d'expliquer les erreurs), de synthèse automatique des résultats et/ou des comportements ».

Dans le cadre de la conduite, le formateur peut ainsi apporter à l'apprenant des rétroactions, corrections et/ou conseils de façon concomitante à la performance (Blana, 1996; Jelmer & Slob, 2008; Tomaske, 1999). En fonction des performances de l'apprenant, il peut par exemple faire varier les situations d'apprentissage pour les rendre plus ou moins difficiles. Il peut également indiquer visuellement les indices importants dans l'environnement et la marche à suivre pour gérer la situation de façon optimale.

2.4.3 *Deux facteurs d'acceptabilité importants des simulateurs*

2.4.3.1 *Acceptabilité économique*

Les simulateurs de conduite sont des dispositifs onéreux, surtout dans leur version les plus fidèles. Par exemple, le NADS-1 de l'Université de l'Iowa aura coûté plus de 120M de dollars au total, pour une rentabilité de 50 programmes de recherche différents en 2015 (The University of Iowa, 2015).

La plupart des structures de formation à la conduite en France sont de taille modeste (Bouteiller, 2009). Elles emploient pour près de 50% d'entre elles un unique enseignant, et à peine 30% seraient structurellement profitables. Par conséquent et malgré une offre croissante et des prix certainement en deçà de ceux pratiqués dans le monde de la recherche³, l'achat d'un tel dispositif pourrait représenter un coût d'investissement trop élevé pour un secteur économiquement fragile (Bouteiller, 2009).

2.4.3.2 *Mal des simulateurs*

Le mal du simulateur est un syndrome proche du mal des transports. Souvent moins sévères, ses symptômes peuvent se traduire par des nausées pouvant aller jusqu'au vomissement, des vertiges, un inconfort oculaire et une désorientation (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993). Ce syndrome fait l'objet d'une attention particulière dans le domaine de la simulation pour l'expérimentation et la formation (ex. Classen, Bewernitz, & Shechtman, 2011; R. Curry, Artz, Cathey, Grant, & Greenberg, 2002; Kim, Rosenthal, Zielinski, & Brady, 2012; Milleville-Pennel & Charron, 2015; Tanaka & Takagi, 2004). En premier lieu, parce qu'il peut être responsable d'une mortalité expérimentale non négligeable. En second lieu parce qu'il peut entraîner une dégradation des performances des participants à l'expérimentation, ou une dégradation de la qualité de leur apprentissage lors d'un entraînement.

³ Le coût à l'achat des simulateurs ne sont pas en accès libre chez les entreprises leader du marché Français (ex. <http://www.develter.com/> ; <https://www.ediser.com/> ; <http://thegooddrive.fr/fr/accueil.html>)

Dans un cadre d'usage généralisé en formation, un tel syndrome pourrait rendre compliqué le recours aux simulateurs. En effet, il est susceptible de causer l'abandon de nombre d'apprenants, en particulier les femmes plus touchées par ce syndrome (Classen et al., 2011). Il limiterait également l'utilisation des simulateurs de haute mais aussi de moyenne fidélité, pourtant les plus efficaces pour l'apprentissage (Klüver et al., 2016). En effet, plus l'angle visuel d'immersion est élevé, plus la vitesse angulaire perçue par le conducteur est importante, plus le mal du simulateur est important (Kim et al., 2012; Tanaka & Takagi, 2004). Enfin, il limiterait le temps passé à apprendre en simulateur, car plus la durée de l'entraînement est importante, plus les risques de développer le mal du simulateur augmentent (Cobb, Nichols, Ramsey, & Wilson, 1999).

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu que la conduite est une activité complexe et dynamique, qui peut être hiérarchisée en trois niveaux de comportements : opérationnel, tactique et stratégique. Dans ce cadre, la matrice GDE (Assailly, 2016a; Hatakka et al., 2002) propose 5 niveaux de compétences à maîtriser pour conduire de manière sûre et efficace. Les trois premiers niveaux de la matrice renvoient directement aux trois niveaux de comportement de conduite. Les deux niveaux supplémentaires introduisent les compétences liées à la gestion du contexte de la conduite. Les compétences décrites par la matrice concernent la maîtrise l'ensemble des situations de conduite, normales ou à risque, ainsi que les compétences d'auto-évaluation des conducteurs. Les compétences de haut-niveaux (au-dessus du niveau 1 opérationnel), apparaissent les plus impliquées dans les défaillances causant le sur-risque des conducteurs novices (Assailly, 2016a; Deery, 1999; McKnight & McKnight, 2003; Scott-Parker et al., 2009).

En conduite post-permis, les mécanismes d'apprentissage de ces compétences seraient avant tout pratiques et expérientiels (A. Y. Kolb & Kolb, 2012). Ce seraient la rencontre avec des situations critiques pour l'apprentissage (nouvelles, rares, mal maîtrisées, ambiguës, sévères), qui dépassent les capacités des conducteurs novices, qui déclencherait la prise de conscience nécessaire à l'apprentissage expérientiel (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016). Dans ce cadre, le simulateur de conduite semble être l'outil idéal pour reproduire les conditions optimales de l'apprentissage expérientiel. Notamment, il permet de confronter les apprenants à diverses situations critiques, sans risque pour la sécurité et en bénéficiant de multiples outils de contrôle des situations et de mesure des compétences. Une question fondamentale concerne l'identification des situations critiques permettant l'apprentissage des compétences. Une seconde question concerne alors l'identification des liens entre les caractéristiques de ces situations, et les compétences qu'elles permettent de développer.

Dans le prochain chapitre, nous détaillons en particulier les compétences de conduite de haut niveau (situées au-dessus du niveau 1 opérationnel), leurs composantes, leurs interrelations et leurs rôles dans l'efficacité et la sécurité de la conduite. En effet, ces compétences sont les plus souvent impliquées dans les défaillances des conducteurs novices générant leur sur-risque (Braitman et al., 2008; Deery, 1999; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018).

3 Les compétences de conduite de haut niveau

La vocation de ce chapitre est de synthétiser l'ensemble des compétences de conduite de haut niveau requises pour la maîtrise des situations de conduite, sur la base d'une revue de la littérature. Il s'agit d'une part des compétences perceptives et cognitives nécessaires à l'évaluation de la situation (perception, compréhension, anticipation) et à la prise de décision pour la maîtrise des situations de conduite (matrice GDE ; Niveau 2 ; Hatakka et al., 2002) et, d'autre part, des compétences d'autoévaluation et de gestion des ressources personnelles et du contexte social. Ces quatre groupes de compétences de haut niveau y sont représentées comme un système en interaction où co-évoluent le contexte externe (situation de conduite, y compris dans sa dimension sociale), le contexte interne (traits, états du conducteur, confiance, etc.) et les objectifs de conduite (figure 4).

Le déploiement des compétences se traduit par la modification de l'environnement et/ou la modification de l'état psychologique du conducteur. Cette modification est alors évaluée rétroactivement par le conducteur et contribue à mettre à jour son évaluation globale de la situation. Dans cette perspective, les compétences possèdent également chacune une relation privilégiée vis-à-vis des différents facteurs de risque de la conduite, qu'elles contribuent respectivement à neutraliser.

Les compétences de haut niveau entretiennent dans le même temps de fortes interrelations. Par exemple, une mauvaise gestion de la fatigue peut influencer négativement les compétences de perception et de maintien de l'attention, causant ainsi une évaluation erronée de la situation (Hamid, Samuel, Borowsky, Horrey, & Fisher, 2016). Cette évaluation erronée peut amener le conducteur à prendre une décision inefficace (M. Green, 2000; Summala, 2014; Tanida & Pöppel, 2006).

La suite de ce chapitre précise et discute ces quatre grands groupes de compétences, leurs relations et leurs implications dans le sur-risque d'accidents chez les jeunes conducteurs.

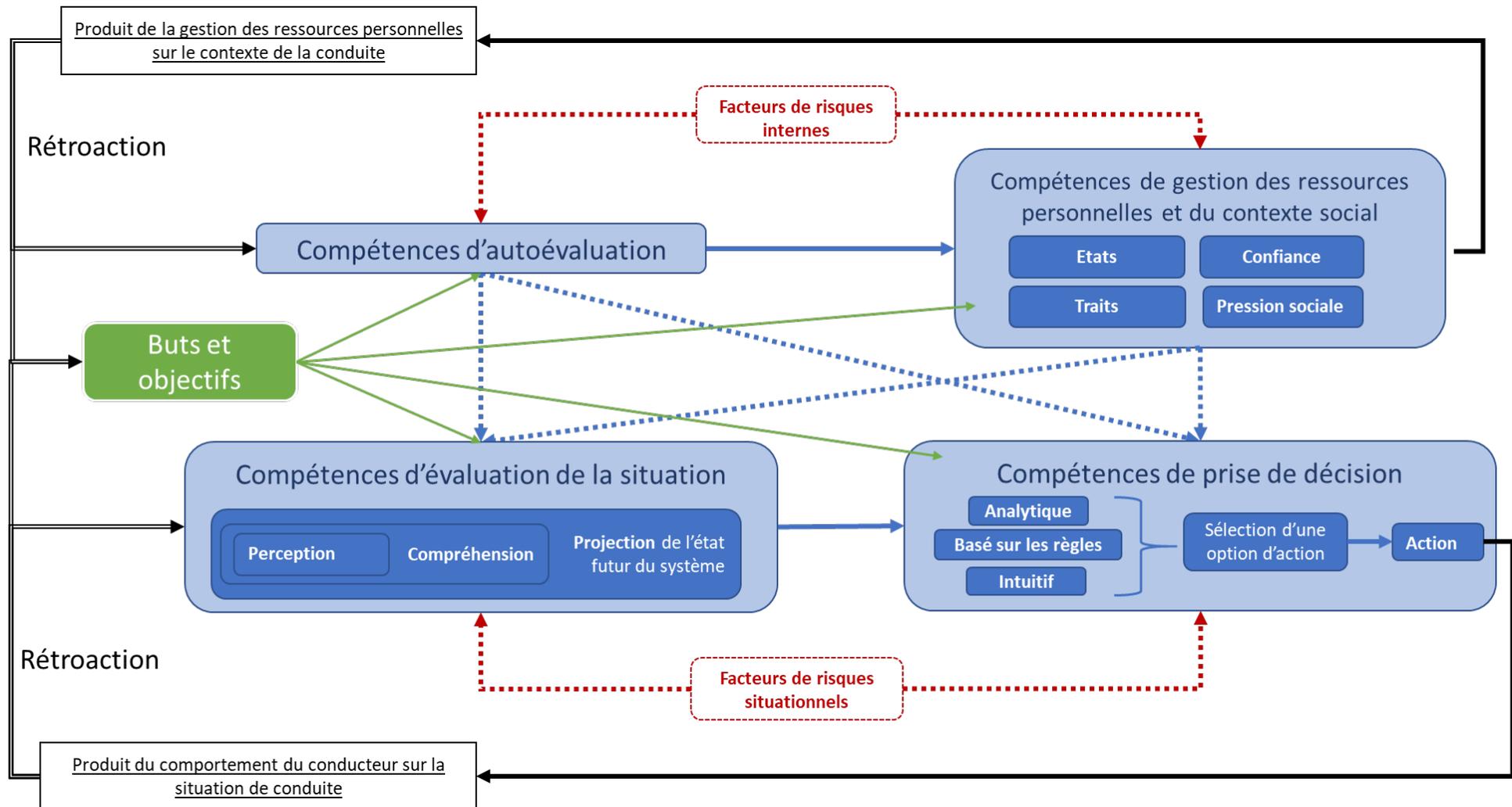


Figure 4, schéma de synthèse des compétences de haut niveau, de leurs interrelations et de leurs rôles pour maîtriser les risques et assurer l'efficacité de la conduite – basé sur le modèle de l'évaluation de la situation de FLIN et al., (2008) et sur les modèles de la prise de décision de Klein (1986, 2008) et Flin (2008). Boîtes bleues : compétences ; boîtes rouges : facteurs de risque associés à la conduite. Flèches bleues : effets des compétences d'évaluation sur les compétences de décision et de gestion des ressources personnelles ; flèches vertes : effets des buts du conducteur sur le déploiement des compétences ; flèches pointillées bleues : effets des compétences sur le déploiement d'autres compétences ; flèches pointillées rouges : influence des facteurs de risque sur le déploiement des compétences ; flèches noires : effet des compétences sur la situation et le contexte de la conduite ; flèches noires creuses : effet rétroactif du déploiement des compétences sur les compétences d'évaluation du conducteur

3.1 Les compétences perceptives et cognitives

3.1.1 L'évaluation des situations de conduite

3.1.1.1 Le modèle de la conscience de situation (Endsley, 1995)

Le modèle de Endsley fait actuellement référence pour l'étude des mécanismes d'évaluation des situations dynamiques et complexes par un humain (voir figure 5 ; Endsley, 1988, 1995a, 1995b, 2015a; Stanton et al., 2017). Il a ainsi été appliqué à de nombreux domaines de recherche en sécurité tels que l'aéronautique (Cuevas & Aguiar, 2017; Endsley, 1988), la médecine (Rosenman et al., 2018), le minage offshore (Roberts, Flin, & Cleland, 2015; Sneddon, Mearns, & Flin, 2013), l'énergie (Panteli & Kirschen, 2015). Il est l'un des plus utilisés pour l'activité de conduite (Salmon, Stanton, & Young, 2012).

Selon ce modèle, l'évaluation de la situation par l'opérateur repose sur 3 processus pour obtenir une bonne conscience de la situation : la perception de la situation, sa compréhension à l'aide des connaissances et des schémas de situations disponibles a priori et la projection de l'état futur du système. Ces trois processus sont cycliques, interdépendants et continus (Endsley, 1995b, 2015b). La conscience de la situation de l'opérateur est ainsi mise à jour en permanence par une boucle de rétroaction dynamique entre l'opérateur, l'environnement et les effets du premier sur le second (Endsley, 2015b).

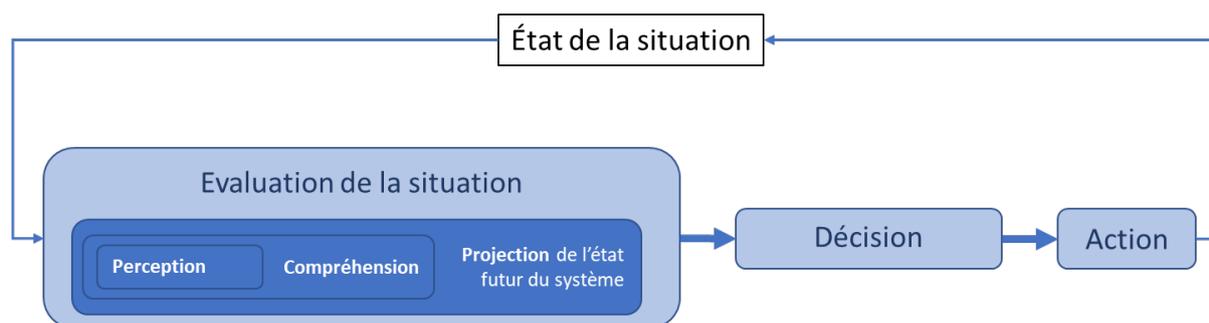


Figure 5, modèle de l'évaluation de la situation (tiré de Endsley, 1995b)

3.1.1.2 Perception passive, perception active

Le conducteur perçoit les éléments d'intérêt dans l'environnement, c'est-à-dire qu'il traite les informations sensorielles en provenance du monde dans le but de surveiller l'état de l'environnement et de contrôler l'avancement de la tâche dans laquelle il est engagé. Gugerty (2011), sur la base des travaux de Leibowitz & Owens (1967), identifie deux modes de perception des situations de conduite : passif et actif.

La « perception passive » est automatique et inconsciente. Elle permet d'assurer la surveillance continue de l'environnement routier, notamment périphérique, ainsi que les tâches élémentaires de guidage du véhicule (Leibowitz & Owens, 1977). La perception passive est soutenue par la vision périphérique (Leibowitz & Owens, 1977) et par les schémas d'exploration visuelle des scènes routières, fortement automatisés (Crundall & Underwood, 1998; Crundall, Underwood, & Chapman, 1999, 2002).

La « perception active » réfère aux opérations contrôlées, conscientes et contextualisées d'exploration de la situation. Il s'agit d'une perception guidée, basée sur la vision focale maculaire, qui a pour objectif la recherche et la détection d'éléments d'intérêt pour l'efficacité et la sécurité de la conduite dans l'environnement routier, et l'exploration soutenue de ces éléments une fois détectés (ex. Chapman & Underwood, 1998; Crundall et al., 2012).

Ces deux processus, ne sont pas indépendants pour autant. Le phénomène de capture attentionnelle, qui correspond à une capture de la vision focale survenant lorsqu'un élément mouvant est détecté par la « perception passive » (Yantis & Jonides, 1984), permet la transition entre les deux modes de perception (Gugerty, 2011).

3.1.1.3 Compréhension de la situation et projection sur son évolution

En conduite, des auteurs décrivent le processus de compréhension comme la liaison entre les éléments perçus dans la situation routière, les schémas de situations et connaissances à priori du conducteur concernant les situations de conduite, les risques associés, ainsi que les stratégies d'action à utiliser pour les maîtriser, et les objectifs du conducteur (Crundall, 2016; McDonald et al., 2015).

A partir de sa compréhension de la situation, le conducteur effectue une projection concernant l'évolution de cette dernière. Cette projection est une simulation mentale de l'état et du comportement futur de la situation, de façon à éliminer tout développement surprenant. La projection facilite à son tour la perception active en influençant l'état de vigilance et la mise en place de stratégies de recherche visuelle facilitant la détection et la reconnaissance d'éléments d'intérêts pour la sécurité ou la navigation (McDonald et al., 2015; Sarter & Woods, 1991).

3.1.2 La prise de décision en situation de conduite

Flin et al. (2008 – p.41), définissent la prise de décision comme le « processus visant à atteindre un jugement, ou à choisir une action – ou séquence d'actions – de façon à satisfaire la demande dans une situation donnée ». Faute de modèle spécifiquement adapté à la conduite à notre connaissance, nous nous appuyons sur les travaux de Klein sur la prise de décision naturelle (*Naturalistic Decision Making* - NDM ; voir Klein, 2008) et le modèle SRK (Rasmussen, 1983) pour préciser cette dimension de l'activité et des compétences.

L'objectif de la NDM est en effet de décrire comment les opérateurs prennent des décisions lors de tâches présentant de fortes contraintes temporelles, de sécurité ou d'incertitude (Flin, O'Connor, & Crichton, 2008; Klein, 2008). La théorie de la NDM apparaît ainsi adaptée à la nature dynamique, complexe et à risque de la conduite, ainsi qu'à la nécessité de différencier les méthodes de prise de décision des experts et des novices.

3.1.2.1 Trois modes de prise de décision en conduite

Sur la base de la NDM, le modèle RPD (*Recognition Primed Decision-making*), fait office de référence pour décrire comment les experts prennent des décisions rapides sur la base de leurs connaissances et expériences passées (Klein, Calderwood, & Clinton-Cirocco, 1986). Le modèle RPD emprunte à la théorie du fonctionnement cognitif de Kahneman (système 1 : rapide/inconscient – système 2 : lent/délibéré ; Kahneman & Egan, 2011) pour décrire deux modes de prise de décision : intuitif et analytique (Klein, 1993, 2008; Klein et al., 1986).

Le modèle de la prise de décision dynamique (Flin et al., 2008, voir figure 6) complexifie le modèle RPD en ajoutant un mode de décision basé sur les règles (Rasmussen, 1983) et un mode de décision créatif. Toutefois, la prise de décision créative est rarement utilisée en situation de forte pression temporelle ou de risque élevée (Flin et al., 2008). Par conséquent, nous nous concentrerons ici sur la prise de décision basée sur les règles, plus applicable à la situation de conduite.

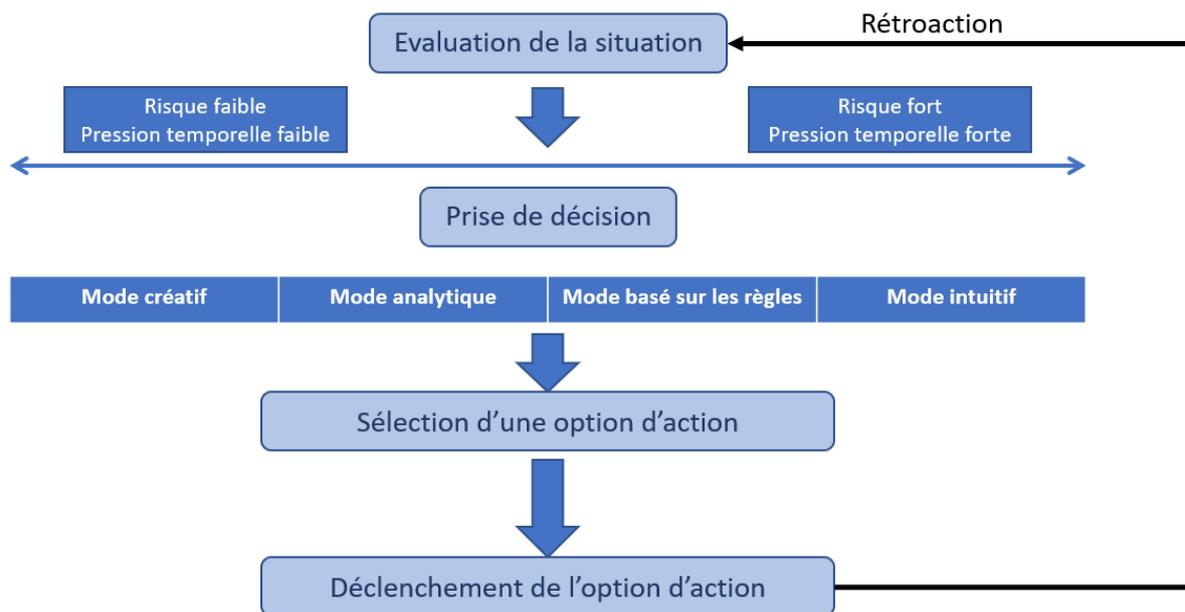


Figure 6, modèle de la prise de décision dynamique (tiré de Flin et al., 2008)

Dans ce cadre du **mode intuitif**, la décision est prise très rapidement par reconnaissance de la situation. Cette reconnaissance se base sur la comparaison entre la situation présente et les schémas de situations déjà connus, issus d'expériences précédentes. La reconnaissance déclenche alors la réalisation des actions typiques, considérées comme étant les plus efficaces lors d'une telle situation. Les experts, qui possèdent un grand nombre de schémas de situation sont alors à même de prendre des décisions rapides, automatiques et inconscientes, même lors de situations présentant de fortes contraintes temporelles.

Le **mode analytique** intervient lorsque la situation n'est pas reconnue par l'individu, ou qu'elle présente des contraintes trop importantes. Klein (1986) prend l'exemple de commandants sapeur-pompier, faisant face à des situations de feux, impliquant la vie de nombreuses personnes. Dans ce cadre, plusieurs suites d'actions potentielles peuvent être générées en réponse aux exigences de la situation. Chacune peut alors faire l'objet d'une simulation mentale, de manière à sélectionner celle qui semble la plus appropriée aux objectifs et contraintes de l'opérateur. Les experts sont particulièrement performants à cette tâche (Klein et al., 1986). Spécifiquement, parce que la première solution générée est très souvent la plus efficace (Johnson & Raab, 2003; Klein, Wolf, Militello, & Zsombok, 1995).

Le **mode basé sur les règles** implique pour l'opérateur d'identifier la situation rencontrée et de la relier à des règles ou à des procédures connues. Flin et al. (2008, p.51-52) précisent que « l'individu cherche activement en mémoire la règle adaptée [...] pour trouver la réponse attendue par la situation ». Le mode de décision basé sur les règles est « utilisé de façon extensive par les novices, qui ont appris les procédures standard pour gérer des situations fréquentes ou à risque » (Flin et al., 2008, p.52).

3.1.2.2 Prises de décisions anticipatoires et réactives pour gérer les contraintes temporelles de la conduite

Le modèle de la prise de décision dynamique inclut également une dimension temporelle importante dans le processus de prise de décision (Flin et al., 2008). Les modes intuitif et basé sur les règles sont utilisés lorsque la pression temporelle est particulièrement forte. Au contraire, les modes analytique et créatif seront utilisés lorsque la pression temporelle est faible. Par conséquent, deux types de prise de décision liés aux contraintes temporelles de la situation peuvent être identifiés en conduite : un type « réactif » et un type « anticipatoire », (voir figure 7 ; Fuller, 1984, 2005).

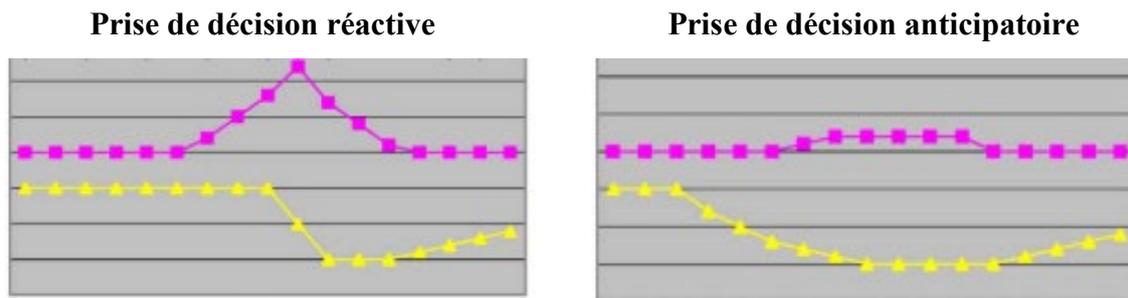


Figure 7, Schéma (tiré de Fuller, 2005) représentant les contrôles réactif (à gauche) et anticipatoire (à droite) sur la vitesse du conducteur (jaune), en fonction de la demande de la tâche (rose) et du temps (abscisse). La demande de la tâche est déterminée par la configuration routière (ex. rond-point VS. Ligne droite) et le comportement des autres usagers. Les unités de vitesse ne sont pas précisées par l'auteur

L'utilisation préférentielle de l'un ou l'autre mode est notamment fonction de l'expérience du conducteur. Les novices « sont davantage confinés au mode réactif pour gérer les situations dangereuses, ce qui produit l'aspect en « dent de scie » constaté dans la figure concernant la prise de décision réactive (Figure 7, graphique de gauche) » (Fuller, 2005 – p.466). « Au contraire, les conducteurs expérimentés démontrent plus souvent des comportements anticipatoires d'évitement des dangers (ex. ralentissements, changements de direction, focalisation de l'attention sur une zone d'intérêt ; Fuller, 1984), ce qui produit l'aspect « en pente douce » constaté dans la figure concernant la prise de décision anticipatoire (Figure 7, graphique de droite) » (Fuller, 2005, p.466).

Fuller (1984 – p1142), prend l'exemple d'un « conducteur sur une route étroite, approchant d'un croisement aveugle ». Dans ce scénario, un autre véhicule non visible approche du croisement en même temps que le conducteur. Deux choix de réponse s'offrent au conducteur. Soit il produit « une décision anticipatoire, en ralentissant ou en concentrant son exploration visuelle sur le coin aveugle du croisement ». Soit-il ne produit « pas de décision anticipatoire, et continue à vitesse constante en direction du croisement ». Dans ce second cas, si un véhicule apparaît, il devra émettre une réponse réactive, sous la forme d'un freinage ou d'un changement de trajectoire brutal.

3.1.2.3 Prises de décisions anticipatoires aux niveaux tactique et opérationnel de la conduite

Les différents modes et types de prise de décision s'appliquent de manière différenciée aux niveaux de comportement tactique et opérationnel de l'activité de conduite (Crundall et al., 2012; Fuller, 1984; M. Green, 2000; Michon, 1985).

Lorsqu'elle a lieu au niveau tactique, la prise de décision est par définition anticipatoire. Elle a pour objectif de permettre au conducteur d'agir en prévention de changements potentiels dans la situation, ou de préparer à l'avance une manœuvre de navigation (Fuller, 1984, 2005; Tanida & Pöppel, 2006). Lors de la phase d'évaluation de la situation, les

phases de compréhension et de projection permettent au conducteur d'émettre une hypothèse sur l'état futur du système. Sur la base de cette hypothèse, il peut alors prendre une décision visant à réduire à l'avance les risques potentiels de la situation (Fuller, 2005). Il s'agira par exemple de réduire la vitesse ou de focaliser son regard sur une zone d'intérêt pour la sécurité ou l'efficacité de la tâche, dans l'environnement (Fuller, 2005; Pradhan et al., 2005).

Peu contrainte par le temps, la prise de décision anticipatoire tactique pourrait faire l'objet des modes intuitifs, basé sur les règles ou analytique (Flin et al., 2008; Klein, 1993, 2008; Klein et al., 1986). Dans ce cadre, l'expérience de conduite va moduler la capacité du conducteur à reconnaître des indices qui préfigurent de l'apparition d'un danger dans la situation (Crundall, 2016; Crundall et al., 2012; Fuller, 2005). Par exemple, des conducteurs expérimentés ralentissent davantage que des novices, en situations simulées présentant un danger potentiel non visible mais suggéré par des indices dans l'environnement (Crundall et al., 2012).

Lorsqu'elle a lieu au niveau opérationnel, la prise de décision peut être anticipatoire ou réactive (Green, 2000). Green (2000), observe les temps de réaction au freinage des conducteurs lors de l'apparition abrupte d'un obstacle sur la route. Le cadre opérationnel est défini par deux points : une contrainte temporelle très forte (temps court pour freiner à l'apparition de l'obstacle) et l'obligation pour les conducteurs de conduire à une vitesse constante, qui les empêche de prendre une décision anticipatoire au niveau tactique. La prise de décision y serait intuitive. En effet, la contrainte temporelle prévient toute décision sur le mode analytique (Flin et al., 2008; Klein, 1993, 2008). De plus, la compétence de freinage à l'apparition d'un obstacle sur la route est bien maîtrisée par l'ensemble des conducteurs, qui n'ont ainsi pas à faire appel à une prise de décision basée sur les règles (M. Green, 2000).

Green (2000) montre que les conducteurs mettent plus de temps à freiner lorsque l'apparition de l'obstacle ne peut pas être prévue à l'aide d'indices dans l'environnement. La prise de décision y est alors réactive. Au contraire, ils mettent moins de temps à freiner lorsque l'apparition de l'obstacle est explicitement attendue, c'est-à-dire que le conducteur sait qu'il va devoir freiner à l'apparition d'un signal dans l'environnement dont il connaît la position. La prise de décision y est alors anticipatoire.

Par conséquent, lorsqu'un événement est anticipé, la prise de décision est plus rapide que lorsqu'un événement est inattendu. L'auteur indique que « l'attente » dans une situation est notamment fonction de l'expérience du conducteur. Les conducteurs expérimentés sont en effet capables d'identifier dans l'environnement des indices préfigurant d'une situation dans laquelle ils sont susceptibles de devoir freiner.

3.2 Les compétences d'autoévaluation et de gestion des ressources personnelles et du contexte de la conduite

Les compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles sous-tendent la gestion du contexte de la conduite. En effet, la sécurité des conducteurs sur la route ne dépend pas uniquement de leur capacité à maîtriser les situations de conduites *per se*. Les conducteurs doivent également être capable de maîtriser les éléments extérieurs à la situation routière, susceptibles d'influencer négativement la sécurité et l'efficacité de cette dernière (Assailly, 2013, 2016a; Hatakka et al., 2002).

L'auto-évaluation peut être définie comme une compétence métacognitive permettant au conducteur d'identifier les risques engendrés par le contexte interne tel que par exemple l'état de stress ou de fatigue ou les traits de personnalité augmentant la prise de risque (ex : recherche de sensation), mais également le contexte social externe (pressions ou distractions exercées par les pairs) (Hatakka et al., 2002; Marottoli & Richardson, 1998). Ces compétences

d'auto-évaluation lui permettent alors de compenser ces risques sur la base de ses ressources personnelles, en permettant l'identification et la mise en place de stratégies de « coping » visant à en limiter l'influence (Hatakka et al., 2002; Kontogiannis, 2006; Paterson & Dawson, 2016).

3.2.1 Auto-évaluer et gérer le contexte interne de la conduite

Le contexte interne est composé des traits de personnalité et des états physique et psychologique du conducteur. Les traits sont des attributs stables de la personnalité d'un individu. Les états sont des attributs temporaires de la personnalité ou des ressentis transitoires du conducteur. Il comprend également la confiance en soi, qui peut être définie comme la croyance d'un conducteur en ses propres compétences de conduite (Marottoli & Richardson, 1998). Cette dernière découle notamment de l'autoévaluation par le conducteur de ses compétences de conduite techniques, perceptives et cognitives, aux niveaux opérationnel et tactique.

3.2.1.1 Contextes internes à risque chez les conducteurs novices

Les traits de personnalité les plus couramment retenus comme facteurs explicatifs du sur-risque des novices sont la recherche de sensation, l'anxiété et la colère au volant (Arnett, Offer, & Fine, 1997; Cestac, Paran, & Delhomme, 2011; Hittner & Swickert, 2006; Machin & Sankey, 2008; Zicat, Bennett, Chekaluk, & Batchelor, 2018). Les états couramment retenus comme facteur explicatif des accidents de la route chez les conducteurs novices sont la fatigue et le stress (Ge et al., 2014; Gulian et al., 1989; Paterson & Dawson, 2016). Par ailleurs, les conducteurs novices sont sur-confiants quant à leurs compétences de conduite en comparaison des conducteurs expérimentés. Ils s'estiment meilleur conducteur qu'ils ne sont en réalité et sous estiment leurs risques d'accidents, en comparaison de leurs pairs (Assailly, 2010, 2013; De Craen, Twisk, Hagenzieker, Elffers, & Brookhuis, 2011; Deery, 1999; Gregersen, 1996; Mynttinen, Sundström, Koivukoski, et al., 2009; Sundström, 2008).

L'influence délétère du contexte interne sur la sécurité et l'efficacité de la conduite est double. Un contexte interne défavorable peut augmenter le nombre de comportements à risque et de violations (voir par exemple Deery, 1999; Deffenbacher, Lynch, Oetting, & Yingling, 2001; Paterson & Dawson, 2016; Scott-Parker et al., 2009; Stephens, Hill, & Sullman, 2016; Zhang et al., 2015). Les violations désignent des actions dépassant délibérément les règles légales et/ou de sécurité dans une situation de conduite donnée (ex. un excès de vitesse ; Reason et al., 1990; Wickens et al., 2008).

Par ailleurs un contexte interne défavorable peut aussi augmenter le nombre d'erreurs en affectant négativement les compétences de conduite de haut niveau perceptives et cognitives, déjà faiblement développées chez les novices (Deery, 1999; Hamid et al., 2016; Lucidi et al., 2006; Mayhew, 2003; Paterson & Dawson, 2016; Recarte & Nunes, 2003; Sullman, 2015). Par exemple, des conducteurs novices fatigués sont plus lents à détecter les dangers routiers que les conducteurs expérimentés tout aussi fatigués (Miyata et al., 2010; S. S. Smith, Horswill, Chambers, & Wetton, 2009). De la même manière des conducteurs sur confiants se mettent en danger, en conduisant à la limite de leurs compétences de conduite (Boccaro, Delhomme, Vidal-Gomel, & Rogalski, 2011; McKenna, 1993).

3.2.1.2 Trois facteurs pour expliquer l'influence du contexte interne chez les novices

Trois facteurs expliquent cette influence négative sur la sécurité du contexte interne chez les novices. D'abord, ces derniers ont une moins bonne auto-évaluation de leurs traits de personnalité à risque, de leurs états et de leurs compétences de conduite (Amado, Arikani, Kaça, Koyuncu, & Turkan, 2014; Dahl, 2008; Hatakka et al., 2002; Sundström, 2008).

Ensuite, ils évaluent moins bien les risques associés à un contexte interne à risque. Par exemple, il considère la conduite en état de fatigue comme étant moins risquée qu'elle ne l'est réellement (Hatfield, Murphy, Kasparian, & Job, 2005; Lucidi et al., 2006; Scott-Parker et al., 2009; Watling, Armstrong, Obst, & Smith, 2014; Watling, Armstrong, Smith, & Wilson, 2016; Williamson, Friswell, Olivier, & Grzebieta, 2014).

Enfin, ils régulent plus difficilement l'impact négatif de leur contexte interne que les conducteurs expérimentés plus âgés (Dahl, 2008; Deffenbacher et al., 2001; Hatakka et al., 2002; Lucidi et al., 2006). Notamment, ils adoptent des stratégies pour le gérer peu efficaces et moins adaptées (Hatfield et al., 2005; Nordbakke & Sagberg, 2007; Scott-Parker et al., 2009; Watling, 2014; Watling et al., 2016).

3.2.2 Gérer le contexte externe de la conduite

En conduite, le contexte externe concerne essentiellement l'influence exercée par les pairs. Cette influence peut être double : il peut s'agir d'une pression sociale, enjoignant le conducteur à ne pas respecter les règles de sécurité de la conduite (J. P. Allen & Brown, 2008; Chein et al., 2011; A. E. Curry et al., 2012; Shepherd et al., 2011) ou d'une distraction, éloignant l'attention du conducteur de la tâche de conduite (Caird, Simmons, Wiley, Johnston, & Horrey, 2018; Huisingsh, Griffin, & McGwin, 2015; NHTSA, 2015; Pickrell, 2015).

3.2.2.1 Gérer les pressions sociales en conduite

Lors d'une situation de conduite, l'influence du contexte externe sur la sécurité et l'efficacité de la conduite se fait essentiellement par le biais des pressions et influences sociales s'exerçant sur le conducteur (Assailly, 2013, 2016b). En conduite, cette influence est essentiellement proximale (J. P. Allen & Brown, 2008), c'est-à-dire qu'un passager exerce une pression directe sur le conducteur, pour le pousser à adopter un comportement inadapté à la situation de conduite. Par exemple, dans une situation de conduite en ville, le passager enjoint verbalement le conducteur à ne pas respecter les limitations de vitesse en vigueur (A. E. Curry et al., 2012; Shepherd et al., 2011).

Les conducteurs novices sont plus susceptibles que les conducteurs expérimentés d'avoir leurs comportements influencés négativement par les pressions exercées par leurs passagers (e.g. Chein, Albert, O'Brien, Uckert, & Steinberg, 2011; Gheorghiu, Delhomme, & Felonneau, 2015; Simons-Morton, Lerner, & Singer, 2005; Vollrath, Meilinger, & Krüger, 2002). Cette influence négative des pairs se traduit par l'adoption de plus de comportements à risque et des violations, à la fois en situations réelle et en conditions expérimentales (Chein et al., 2011; B. G. Simons-Morton et al., 2011; Van Hoorn, Crone, & Van Leijenhorst, 2017).

3.2.2.2 Gérer les distractions engendrées par les passagers

Par ailleurs, sans exercer une influence forcément négative sur les normes de la conduite, l'environnement social peut être une source importante de distraction. Les distractions générées par un autre individu durant la conduite sont ainsi couramment retenues pour expliquer les accidents de la route (Caird et al., 2018; NHTSA, 2015). Or, les conducteurs novices sont plus susceptibles de parler avec un passager ou d'utiliser leur téléphone lorsqu'ils conduisent (Huisingsh et al., 2015; Pickrell, 2015).

Chez les conducteurs novices, les effets négatifs de telles distractions touchent en particulier les compétences de conduite de haut niveau perceptives et cognitives. En effet, dans une telle situation, le conducteur novice doit assurer l'exécution simultanée de deux tâches cognitivement coûteuses (Briggs, Hole, & Land, 2011; Paxion, Galy, & Berthelon, 2014). Ce partage des ressources affecte peu les compétences de conduite de bas niveau, fortement automatisées et peu coûteuses. toutefois, il affecte fortement les compétences de conduite de

haut niveau, couteuses et encore mal maîtrisées par le conducteur novice (Caird et al., 2018; Paxion et al., 2014).

3.3 L'implication des compétences de conduite de haut niveau dans le sur-risque des novices : données issues de l'accidentologie

La majorité des travaux explorant les causes et conséquences des défaillances des compétences de conduite dans le sur-risque des novices est fondée sur l'analyse de situations dangereuses (Braitman et al., 2008; Dingus et al., 2006; McDonald et al., 2014; NHTSA, 2015; ONISR, 2017; Seacrist et al., 2018; World Health Organization, 2015). Ces travaux sont basés soit sur l'analyse de bases de données issues de campagnes d'enquêtes préalables (la National Motor Vehicle Crash Causation Survey pour Braitman et al., 2008 ; et les résultats du Strategic Highway Research Program 2 pour Seacrist et al., 2018), soit sur les analyses de rapports de police obtenus auprès des autorités (McDonald et al., 2014).

3.3.1 Des situations accidentelles et presque accidentelles

Les situations dangereuses de conduite incluent les situations accidentelles et presque accidentelles (Dingus et al., 2006; Klauer, Dingus, Neale, Sudweeks, & Ramsey, 2006; Seacrist et al., 2018). Ces dernières, au contraire de la situation d'accident, n'aboutissent pas à la collision entre le véhicule du conducteur et un élément de l'environnement.

L'intérêt d'inclure des situations presque accidentelles dans l'étude du sur-risque des conducteurs novices est multiple. En premier lieu, malgré l'absence de choc ces situations présentent une forte ressemblance qui se traduit par la même signature cinétique (Dingus et al., 2006; Klauer et al., 2006). En second lieu, les situations d'accident sont par définition des situations d'échecs. Une focalisation sur ces dernières bloquerait alors l'accès aux apprentissages issus de l'expérience de situations dangereuses non accidentelles (Stefanova, Burkhardt, Filtner, et al., 2015). En troisième lieu, les conducteurs rencontrent significativement plus de situations presque accidentelles que de situations accidentelles, en particulier lors de leurs premiers mois de conduite (ex. 5,5 presque accident pour 1 accident dans Lee et al., 2011; 3,75 presque accident pour un accident dans Seacrist et al., 2018). Par conséquent, l'inclusion des situations presque accidentelles dans l'accidentologie routière renforcerait la puissance statistique et donc la validité des résultats observés (Seacrist et al., 2018). En quatrième lieu, les conducteurs novices démontrent significativement plus de presque accident que les conducteurs expérimentés, par million de miles conduits (2,7 VS 18). Les conducteurs expérimentés démontrent par ailleurs un rapport presque accident/accident significativement meilleur que les conducteurs novices (14,1/1 VS. 3,75/1) (Seacrist et al., 2018). Un tel écart témoigne des effets positifs de l'expérience sur la presque accidentalité des conducteurs.

3.3.2 Causes et caractéristiques des situations dangereuses

3.3.2.1 Des situations majoritairement causées par des défaillances perceptives et cognitives

La majorité des erreurs commises par les conducteurs novices sur la route sont causées par des défaillances des compétences d'évaluation de la situation et de prises de décision (Voir tableau 4 ; Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003). Elles représentent près de 85% des erreurs commises au total et ont majoritairement lieu au niveau situationnel tactique.

Les erreurs de perception et d'évaluation représentent ainsi 40 à 60% des erreurs au total. Elles sont constituées d'erreurs de surveillance et d'allocation de l'attention (ex. le conducteur n'a pas détecté le danger), ainsi que d'erreurs de compréhension de la situation (ex. le conducteur comprend mal un cédez le passage).

Les erreurs de décision représentent quant à elles 20 à 40 % des erreurs totales. Elles incluent des erreurs de gestion de la vitesse (ex. vitesse trop élevée pour les conditions), et des erreurs de gestion de la distance avec les autres usagers (ex. suit de trop près).

3.3.2.2 *Quelques situations causées par des difficultés à gérer le contexte interne et des erreurs techniques*

Entre 5 et 15% des situations sont causées par des déficits de compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles (voir tableau 4 ; Braitman et al., 2008; A. E. Curry, Hafetz, Kallan, Winston, & Durbin, 2011; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003).

Ces accidents et presque accidents concernent notamment les comportements de violations, et les erreurs causées par des situations de conduite sous influence, de pression sociale, de distractions, ainsi que de fatigue au volant ou de panique (McGwin, Jr & Brown, 1999; Paxion et al., 2014; Zhang, Chan, Ba, & Zhang, 2016).

Enfin, les erreurs techniques, qui concerne les défaillances des compétences sensori-motrices de contrôle du véhicule ne représentent que 10% des défaillances des conducteurs novices ayant menées à une situations dangereuses (Braitman et al., 2008; A. E. Curry et al., 2011; McDonald et al., 2014). Il s'agit de situations de calage ou de mauvais contrôle du véhicule en virage par exemple.

Tableau 4, types d'erreur commises par les conducteurs novices (basé sur Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018)

Types d'erreurs	Estimations des taux d'erreur commises
Perception, évaluation	40-60%
Prise de décision	20-40%
Technique	10%
Gestion du contexte	5-15%

3.3.2.3 *Caractéristiques des situations dangereuses plus fréquemment rencontrées par les novices*

Trois scénarios regroupent la plupart des situations dangereuses rencontrées par les conducteurs. Ces scénarios sont identiques entre conducteurs novices et expérimentés (voir tableau 5 ; Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; Seacrist et al., 2018).

Les scénarios impliquant un autre usager de la route constituent la majorité des situations dangereuses rencontrées. Le scénario d'un « véhicule coupant la trajectoire d'un autre véhicule » est le scénario le plus souvent représentés dans les situations d'accident. Il représente près de 15% de ces situations (McDonald et al., 2014). De même, il représente 15% des situations presque accidentelles (Seacrist et al., 2018).

Le scénario « sortie de route » représente 7% des situations presque accidentelles (Seacrist et al., 2018). Ce scénario représente 11,5% des scenarios accidentels (McDonald et al., 2014). Dans 7% des cas d'accident, la sortie de route a lieu lors d'un virage. Dans 5% des cas, le conducteur novice sors de la route alors qu'il allait tout droit (McDonald et al., 2014).

Le scénario de “collision avant-arrière” représente jusqu’à 75% des scénarios presque accidentels rencontrés par les conducteurs (Seacrist et al., 2018). Toutefois, il ne représente que 10 % des scénarios accidentels (McDonald et al., 2014).

D’autres scénarios minoritaires incluent notamment des « face à face » entre véhicules (1%) et des « collisions avec un animal » (< 1%) (Seacrist et al., 2018).

Tableau 5, types situations dangereuses rencontrés par les conducteurs novices (basé sur Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018)

Types de situations dangereuses	Accidents	Presque-accidents
Véhicule coupant la trajectoire d’un autre véhicule	15%	15%
Sortie de route	11.5%	Pas de donnée
Collision avant arrière	10%	75%
Face à face avec un véhicule	1%	Pas de données

3.4 Conclusion

Ce chapitre souligne l’influence des compétences de conduite de haut niveau sur la sécurité et l’efficacité de la conduite. Les compétences de conduite de haut niveau forment un ensemble complexe qui assure l’efficacité de la conduite, en soutenant les compétences techniques opérationnelles (Deery, 1999; Flin et al., 2008; Hatakka et al., 2002). Les travaux montrent le rôle spécifique de ces compétences pour la sécurité et l’efficacité de la conduite. Les compétences perceptives et cognitives servent à maîtriser la situation de conduite, alors que les compétences d’auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles servent à maîtriser le contexte de la conduite.

Les données d’accidentologie montrent que les compétences d’évaluation et de prise de décision sont les plus impliquées dans le sur-risque des novices. Ces dernières seraient notamment associées à la maîtrise de situations impliquant la gestion des interactions avec d’autres usagers de la route.

Dans la suite de ce travail, une attention particulière sera apportée aux compétences de conduite de haut niveau perceptives et cognitives. Dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons particulièrement aux approches permettant de développer ces compétences en réalité virtuelle.

4 Développer les compétences de conduite perceptives et cognitives en réalité virtuelle

4.1 Introduction

La question de l'efficacité du simulateur pour le développement des compétences de conduite reste difficile à traiter encore aujourd'hui. En effet hormis quelques données, il y a peu d'information sur l'équipement en simulateurs et leur utilisation réelle dans les cursus de formation à la conduite en Europe. Ainsi aux Pays-Bas, une centaine de simulateurs était en service en 2005 dans les écoles de conduite et 3 à 5% des apprenants néerlandais y réaliseraient une partie de leur cursus de formation en conduite simulée (Goode et al., 2013; Kappé & Emmerik, 2005). Korteling, Helsdingen, & Baeyer, (2000) rapportent que ces écoles de conduite indiquent une augmentation de 10% du taux d'obtention du permis de conduire. Le manque d'information sur l'existant et sur les utilisations réelles se retrouve en France, malgré le fait que de plus en plus de simulateurs sont commercialisées par des sociétés privées à destination des auto-écoles (<http://thegooddrive.fr/> ; www.develter.com ; www.ediser.com), avec éventuellement des formations associées. Cependant, le contenu précis de ces formations et leur utilisation réelle dans les auto-écoles sont inconnus.

Ce chapitre s'intéresse à la conception et à l'efficacité des simulateurs pour l'apprentissage des compétences de conduite des novices, en particulier sous l'angle de l'efficacité des formations utilisant le simulateur comme moyen d'exposition écologique des conducteurs novices à des situations critiques pour l'apprentissage (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016). En effet, un intérêt principal de ces dispositifs est de permettre d'entraîner les opérateurs à des tâches risquées, difficiles ou complexes, dans des conditions se rapprochant des conditions réelles (Burkhardt, Lourdeaux, & Mellet-D'Huart, 2003; Cabon et al., 2016; Kappé, de Penning, Marsman, & Roelofs, 2009). En plus de détailler les usages du simulateur pour la formation, il abordera la question spécifique de l'utilisation des rétroactions dans ce cadre. Centrales pour l'apprentissage (Bangert-Drowns, Kulik, Kulik, & Morgan, 1991; Black & Wiliam, 1998; Kluger & DeNisi, 1996; Luft, 2014; Shute, 2008), la description de leurs caractéristiques et l'évaluation de leur efficacité n'a jamais été directement abordée dans la littérature sur l'apprentissage de la conduite à notre connaissance. Pourtant, un intérêt principal des dispositifs de simulation est de pouvoir proposer une grande variété de rétroactions, aux moments les plus opportuns pour soutenir les apprentissages (Burkhardt, Lourdeaux, & Mellet-D'Huart, 2003).

Quelques revues et méta-analyses s'intéressent à l'usage du simulateur pour l'apprentissage des compétences de conduite, soit dans un cadre large parmi d'autres approches de la formation à la conduite (Beanland et al., 2013; McDonald et al., 2015; Unverricht et al., 2018), soit avec un focus sur l'efficacité de la simulation pour l'apprentissage et le développement des compétences de conduite (Goode et al., 2013; Moreno-Roldán et al., 2018). La majorité des travaux les plus récents s'intéresse aux compétences de conduite de haut niveau (Beanland et al., 2013; Goode et al., 2013; Moreno-Roldán et al., 2018; Unverricht et al., 2018), et plus particulièrement aux compétences pour maîtriser les situations contenant un danger (Beanland et al., 2013; McDonald et al., 2015; Unverricht et al., 2018). Elles concluent que le simulateur apparaît efficace pour développer les compétences techniques mais également de haut niveau (Beanland et al., 2013; Goode et al., 2013; McDonald et al., 2015), sans toutefois que cette efficacité puisse être retrouvée sur route réelle pour ces dernières (Beanland et al., 2013; Goode et al., 2013; Hirsch & Bellavance, 2016; Moreno-Roldán et al., 2018).

Toutefois, ces travaux ne font pas toujours la distinction entre l'utilisation du simulateur à des fins d'entraînement et son utilisation à des fins d'évaluation (Beanland et al., 2013; Goode

et al., 2013; McDonald et al., 2015; Unverricht et al., 2018). Certains incluent des études avec des populations variées (novices, professionnels, expérimentés) sans prendre en compte cette diversité quant à l'évaluation de l'effet au niveau de l'apprentissage des compétences (Goode et al., 2013; Unverricht et al., 2018). D'autres enfin n'évaluent l'efficacité du simulateur pour la formation que par le biais de l'accidentalité sur route réelle ; ceux-ci ne parviennent alors pas à une conclusion satisfaisante (Hirsch & Bellavance, 2016; Moreno-Roldán et al., 2018).

Outre des références générales sur la simulation pour l'apprentissage de la conduite, nous avons choisi de focaliser la présente revue sur les études impliquant directement l'usage de simulateurs dans l'apprentissage et le développement des compétences de conduite et avec une population de conducteurs novices, c'est-à-dire allant de conducteurs en cours de formation à des conducteurs possédant le permis depuis 2 ans ou moins (Government Queensland, 2005; Mayhew, Simpson, & Pak, 2003; McCartt et al., 2003). Il fallait en outre que l'étude décrive la façon d'utiliser le simulateur dans la formation et les rendent clair les compétences entraînées (e.g. technique, de haut niveau). Sur cette base, 18 études ont été identifiées sur la base de la lecture d'articles et de requêtes sur plusieurs bases de données bibliographiques internationales (GoogleScholar, Pysinfo, PubMed, ScienceDirect, Transportation Research Board).

Dans une première partie, nous faisons un état des lieux sur l'usage et l'efficacité des simulateurs pour la formation des compétences de conduite des novices. Dans une seconde partie, nous proposons une analyse des caractéristiques et de l'efficacité des rétroactions formatives que l'on peut y trouver.

4.2 Usage des simulateurs pour la formation des novices : un état des lieux

4.2.1 Simuler la conduite pour la formation : éléments spécifiques

4.2.1.1 Architecture des simulateurs de conduite pour la formation

Les premiers simulateurs de conduite ont été développés dans les années 60 dans une perspective de recherche et d'étude du comportement du conducteur (Blana, 1996; Jelmer & Slob, 2008). Ce n'est qu'à partir des années 70 (Hoskovec & Stikar, 1971), et surtout durant la dernière décennie, que l'usage des simulateurs s'est étendue à l'étude du développement et de l'apprentissage des compétences des conducteurs novices (Fisher, 2011; Goode et al., 2013; Hirsch & Bellavance, 2017).

Les simulateurs de conduite constituent une sous-classe des simulateurs de mouvements (Jelmer & Slob, 2008). Ils visent à produire chez l'utilisateur l'expérience de conduite la plus proche possible de celle expérimentée en situation réelle. Pour ce faire, l'architecture des simulateurs comprend plusieurs parties fonctionnellement distinctes (voir figure 8 ; Blana, 1996; Burkhardt, Lourdeaux, & Bardy, 2003; Cabon et al., 2016; Fan, 2015; Jelmer & Slob, 2008). Ces parties communiquent usuellement entre elles par un réseau informatique et peuvent être distribuées entre plusieurs ordinateurs en fonction de leurs niveaux de sophistication (Cabon et al., 2016).

Un premier composant regroupe les dispositifs de présentation d'information. Il comprend un système de rendu visuel (écrans, casques de réalité virtuelle), un système contrôlant le rendu proprioceptif (pédales, volant, habitacle) et un système de rendu sonore. Un second composant concerne les dispositifs d'entrée de l'information. Il comprend les différents capteurs (volant, pédales) qui permettent d'identifier les actions de l'utilisateur, et les traduire dans l'environnement virtuel. Un troisième composant, appelé « moteur de réalité virtuelle » (Burkhardt, Lourdeaux, & Bardy, 2003, p.3), correspond aux « systèmes matériels et aux logiciels de gestion et de mise à jour de la présentation en fonction des entrées de l'utilisateur. Il comprend généralement une base de données modélisant la scène virtuelle, un modèle des interactions et une représentation de l'utilisateur ».

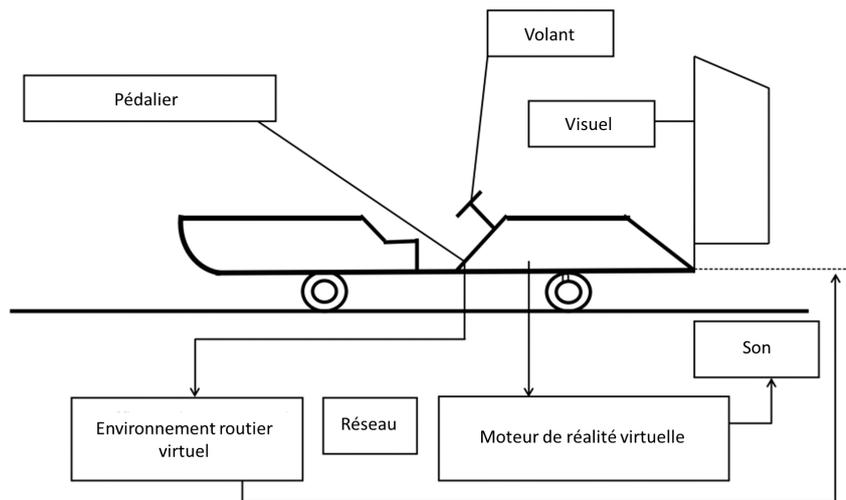


Figure 8, architecture d'un simulateur de conduite pour la formation (d'après Fan, 2015)

Dans un cadre d'apprentissage, un dernier composant comprend les objectifs de formation, c'est-à-dire les compétences à acquérir (ex. compétences techniques, de haut niveau, etc.), ainsi que l'approche pédagogique conçue à cet effet (Burkhardt, Lourdeaux, & Mellet-D'Huart, 2003; Goode et al., 2013). L'approche pédagogique comprend le type de tâche à réaliser par le conducteur (éviter des dangers, suivre un véhicule, négocier des virages, etc.) et les scénarios virtuels associés. Les scénarios désignent l'ensemble des situations de conduite présentant des événements à buts pédagogiques ou évaluatifs (ex. situations contenant des dangers ; Kearney & Grechkin, 2011). L'approche pédagogique comprend aussi le type de rétroaction utilisé (ex. tableau de score, collisions, explications à posteriori) et les modalités d'évaluation (ex. accidentalité sur route réelle ; performances sur simulateur).

4.2.1.2 Catégorisation des simulateurs selon leur degré d'immersion

Les caractéristiques techniques de l'architecture des simulateurs permettent de catégoriser ces derniers en fonction du niveau d'immersion qu'ils proposent aux apprenants (Burkhardt, Lourdeaux, & Bardy, 2003). L'immersion désigne le « degré et la qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action » (Burkhardt, Lourdeaux, & Bardy, 2003, p.4-5).

La conduite est une activité majoritairement visuelle (Gugerty, 2011; Owsley & McGwin, 2010). Par conséquent, une part importante de l'immersion dépend de l'angle de vue proposé par le simulateur. Celui-ci peut s'échelonner de 360° à 45° dans le cas de simulateur mono-écran (voir figures 9 et 10). La conduite est également une activité haptique et tactile. L'immersion du conducteur dépendra aussi de la capacité du simulateur à reproduire les sensations tactiles de la conduite. Ces sensations sont modulées par la reproduction de la cabine et des commandes. Par exemple, certains simulateurs ne proposent qu'un volant sans retour de force, alors que d'autres reproduisent une cabine de pilotage dans les moindres détails. La conduite est également une activité proprioceptive kinesthésique. Par conséquent, l'immersion dépend également de la capacité du simulateur à reproduire les sensations physiques de la conduite (ex. retour de force du volant, sensations d'accélérations). Certains simulateurs peuvent ainsi proposer une base mobile, pouvant engendrer des accélérations sur 2 à 6 directions de l'espace horizontal (voir figure 9 ; The University of Iowa, 2015).

A partir de là, il est possible de distinguer 3 types de dispositifs techniques de simulateurs pour la formation (voir figure 9 et 10). Les simulateurs à haut niveau d'immersion

correspondent aux simulateurs pleine échelle proposant une vue à 360°, ainsi que les simulateurs à base mobile. La seconde catégorie regroupe les simulateurs à niveau d'immersion moyen. Cette catégorie comprend les simulateurs 3 écrans, proposant une vue allant de 120° à 180°. Ils sont à base fixe et peuvent proposer une reproduction simplifiée de l'habitacle de conduite. La troisième catégorie des simulateurs à faible niveau d'immersion correspond aux simulateurs mono-écran, ne proposant qu'un volant et un pédalier comme système de commande du véhicule.

Enfin, une quatrième catégorie comprendrait les dispositifs « non-immersif ». Ces derniers ne comprennent pas les commandes associées (volant ou pédalier) et ne reproduisent pas l'habitacle de conduite. De tels dispositifs restreignent l'interaction entre le conducteur et l'environnement à l'usage d'une souris d'ordinateur ou d'un bouton poussoir, pour signaler la nécessité d'une action (ex. freinage) ou d'éventuels éléments d'intérêt dans l'environnement (ex. danger potentiel) par exemple (Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006).

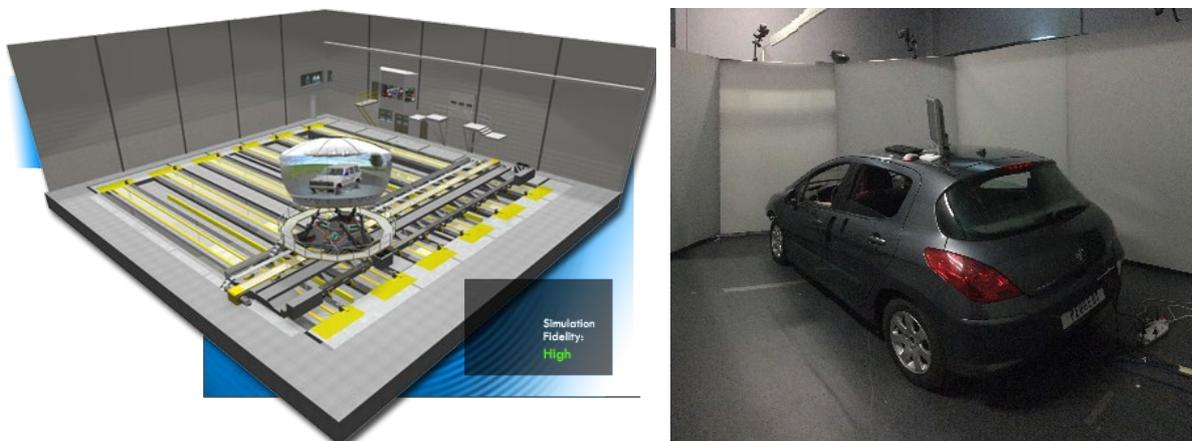


Figure 9, exemples de simulateurs haute immersion. A gauche, le NADS-1 de l'IOWA U (crédit : The University of Iowa, 2015) ; à droite le Simulateur pleine échelle 360° de l'IFSTAR, site de Satory



Figure 10, A gauche un simulateur moyenne immersion à 3 écrans de la société DEVELTER © (crédit : http://www.develter.com/simulateurs-conduite-1_FR_r_40.html) ; à droite un simulateur basse immersion mono-écran (crédit : <https://www.lyonmag.com> et The Good Drive ©)

4.2.2 Typologie des usages des simulateurs de conduite dans la formation

La précédente distinction des simulateurs en termes de niveau d'immersion permet de différencier deux façons d'utiliser cet outil dans la formation.

La première consiste à utiliser des simulateurs à haut, moyen voire bas niveau d'immersion pour exposer de façon écologique l'apprenant à « de multiples scénarios

dangereux, dans une période de temps restreinte en comparaison des expériences rencontrées durant les premiers mois de la conduite » (Wang et al., 2010, p.19). Nous désignerons ce premier type d'usage comme relevant de la formation « par simulateur » à proprement parler.

Ce type d'usage se retrouve dans un peu moins de deux tiers des études considérées dans notre état de l'art (11/18). Les travaux dans cette lignée ciblent en nombre à peu près égal deux types de compétences : les compétences techniques associées au contrôle du véhicule (7/11), et les compétences perceptives et cognitives, avec un focus sur les compétences d'anticipation des dangers (8/11). Il est à noter que quatre études traitent à la fois de compétences techniques et des compétences d'anticipation en conduite (R. W. Allen, Park, Cook, Fiorentino, & Viirre, 2003; R. W. Allen, Park, & Cook, 2010; C. V Cox, Wharam, Mouran, & Cox, 2009; Hirsch & Bellavance, 2017).

Toutefois, 5 études sur les 11 recensées ne rendent pas clair le contenu exact des situations de formations utilisées pour l'apprentissage de ces compétences. Elles signifient ainsi la présence de « leçons » ou de « scénarios d'entraînement » sans préciser les caractéristiques exactes des situations qui y sont rencontrées par les apprenants (R. W. Allen, Park, et al., 2003; R. W. Allen et al., 2010; R. W. Allen, Park, Terrace, & Grant, 2011; C. V Cox et al., 2009; Hirsch & Bellavance, 2017). Parmi ces 5 études, une seule ne cible que les compétences d'anticipation des dangers (R. W. Allen et al., 2011).

Les dispositifs de simulateur utilisés sont le plus souvent à faible immersion mono-écran (6/11). Cinq études utilisent des simulateurs à base fixe 3 écrans. Deux études utilisent des dispositifs à haute immersion, proposant une vue à 360°, une cabine complète ou une base mouvante. Trois études comparent l'efficacité de l'entraînement en fonction du dispositif. Ces dernières combinent des dispositifs à haute, moyenne et basse immersion (R. W. Allen, Park, et al., 2003; R. W. Allen et al., 2010; Falkmer & Gregersen, 2003).

La seconde façon consiste à utiliser des dispositifs « non-immersifs » ou tiers pour l'apprentissage, et à n'utiliser un simulateur au moins de bas niveau d'immersion que comme outil pour évaluer la formation. Ce deuxième type d'usage correspond à un peu plus du tiers restant d'études recensées (7/18). Les travaux dans cette lignée ciblent tous les compétences d'anticipation des dangers. Sur les 7 études recensées, 6 utilisent des ordinateurs pour dispenser la formation. Une seule étude utilise une autre méthode, qui est un entraînement sur route réelle à la conduite commentée (Crundall, Andrews, van Loon, & Chapman, 2010).

Les échantillons utilisés dans l'ensemble de ces travaux varient fortement, allant de 10 (C. V Cox et al., 2009; Hoskovec & Stikar, 1971) à plus de 1000 conducteurs novices entraînés (Hirsch & Bellavance, 2017). Une limite générale est que 9 études sur 18 présentent des effectifs faibles, inférieur à 20 conducteurs entraînés, dont 6 sont inférieurs à 16 (3 dans les études « par simulateurs », 3 dans les études restantes). Par ailleurs, 2 études ne précisent pas les caractéristiques ou la répartition des participants test et contrôle dans l'expérimentation (R. W. Allen et al., 2011; Oron-Gilad & Parmet, 2014).

4.2.2.1 *Acquisition des compétences techniques « par simulateur »*

Par définition, les conducteurs novices constituent la population cible des simulateurs orientés vers l'acquisition des compétences techniques. Sept études portent sur l'apprentissage de compétences techniques au moyen d'un simulateur (R. W. Allen, Park, et al., 2003; R. W. Allen et al., 2010; C. V Cox et al., 2009; Falkmer & Gregersen, 2003; Hirsch & Bellavance, 2017; Hoskovec & Stikar, 1971; van Leeuwen, Happee, & de Winter, 2015). Par ordre décroissant, la compétence technique la plus souvent ciblée est le virage (5/7 études) suivie par le freinage (4/7 études). Ces deux compétences sont par ailleurs associées dans un peu plus de la moitié de ces études (4/7). Une seule étude s'intéresse aux compétences de passage de vitesse.

Sur le plan pédagogique, les formations aux compétences techniques sont basées sur un principe d'exposition des conducteurs à des situations nécessitant leur mobilisation. Certaines formations n'exposent les conducteurs qu'à une fraction de la tâche de conduite. Celle-ci est constituée d'une répétition de situations impliquant directement les compétences techniques entraînées (Hoskovec & Stikar, 1971; van Leeuwen et al., 2015). Par exemple, van Leeuwen, Happee, & de Winter, (2015) soumettent 52 conducteurs novices à 4 sessions répétées de conduite sur simulateur 3 écrans, comprenant chacune plusieurs virages à 90° (voir figure 11). Les participants ont pour instruction de rester le plus proche possible de la ligne centrale. La progression des compétences de suivi de courbe est évaluée au fur et à mesure des 4 sessions.

D'autres proposent aux conducteurs de conduire en situation de trafic, dans lesquelles sont incluses les situations ciblant les compétences (R. W. Allen, Park, et al., 2003; C. V Cox et al., 2009; Falkmer & Gregersen, 2003). Dans ce cas, les conducteurs peuvent par exemple être soumis à des tâches de navigation de difficulté croissante, c'est-à-dire avec un trafic routier de plus en plus dense (R. W. Allen, Park, et al., 2003; C. V Cox et al., 2009), ou à des tâches de suivi de véhicule (Falkmer & Gregersen, 2003).

4.2.2.2 *Acquisition des compétences d'anticipation des dangers « par simulateur »*

Huit études mobilisent un simulateur pour l'acquisition de compétences d'anticipation des dangers (voir tableau 6).

Sur le plan pédagogique, les études recensées se fondent sur une approche dite « par erreur ». Cette approche consiste à confronter les apprenants à des situations construites de façon à favoriser la survenue d'une collision entre le conducteur et un danger potentiel. Le résultat de l'erreur (ou de l'échec), fournit alors à l'apprenant une information consécutive susceptible de faciliter l'apprentissage des compétences défaillantes (Frese, 1995; Ivancic & Hesketh, 2000). Deux types d'approche « par erreur » peuvent cependant être distingués dans la littérature : une approche « passive » et une approche « active ».

L'approche « passive » consiste à confronter les conducteurs à des situations critiques sévères et mal maîtrisées, inspirées des données d'accidentologie (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016; McDonald et al., 2012; McKnight & McKnight, 2003). Les conducteurs sont confrontés à une situation contenant un danger qu'ils doivent impérativement éviter (voir figure 12 ; R. W. Allen et al., 2010; Ivancic & Hesketh, 2000; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Si ils restent passifs, c'est-à-dire si ils n'agissent pas dans la situation, un accident survient invariablement. Allen et al., (2010, p.43), indiquent ainsi qu'ils confrontent les conducteurs à des situations dans lesquelles la présentation des dangers est « agressive et conçue pour favoriser l'apprentissage par erreur ». Ces termes sont repris par Vlakveld et al., (2011, p.5), qui indiquent que leur entraînement est basé sur l'occurrence de dangers qui se matérialisent « agressivement », c'est-à-dire de façon à être difficilement évitables pour les apprenants. Cette approche se retrouve dans toutes les études recensées à l'exception d'une seule (Ivancic & Hesketh, 2000 ; voir tableau 6).

Toutes ces études proposent une seconde phase d'explication « hors simulateur » des erreurs commises (R. W. Allen et al., 2011; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Par exemple, dans l'étude de Vlakveld et al., (2011) les conducteurs sont exposés sur simulateur à des situations contenant un danger. Dans une première étape, les conducteurs ont pour tâche de localiser et d'éviter d'éventuels dangers dans l'environnement. Dans une seconde étape « hors simulateur », les situations sont présentées de façon exocentriques (i.e. en vue d'oiseau ; Unverricht, Samuel, & Yamani, 2018). Elles sont alors accompagnées d'explications à propos des risques encourus, et d'indications précises quant aux comportements nécessaires pour les éviter. Dans l'étude de Wang et al. (2010), la première phase d'exposition « par erreur » passive

est notamment suivie d'une séquence vidéo des mêmes situations, négociées idéalement par un conducteur expérimenté.

Dans l'approche « active », les conducteurs sont confrontés à des situations critiques ambiguës, dans lesquelles un danger n'est pas inséré a priori et de façon déterministe (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016; Ivancic & Hesketh, 2000). C'est plutôt l'action du conducteur, dans une situation où il est susceptible de faire une erreur, qui peut créer le danger. A notre connaissance, la seule étude à proposer cette approche est celle de Ivancic et Hesketh (2000). Ces auteurs proposent plusieurs scénarios simulés à des conducteurs novices, dans lesquels ils doivent négocier des situations ambiguës. En cas d'erreur, ces derniers subissent les conséquences de leur action sous la forme d'une collision ou d'une amende. Par exemple, le conducteur est à l'arrêt, bloqué derrière une barrière sur la voie de droite (voir figure 13). Le trafic environnant lui complique le dépassement de l'obstacle. L'erreur attendue est de forcer le passage, alors que des voitures arrivent en sens inverse.

Toutefois, l'opérationnalisation de ces situations dans les études recensées n'apparaît pas optimale pour favoriser l'apprentissage des novices. En effet, l'expérience de ces erreurs est peu systématique. Bien que les auteurs signalent avoir programmé les dangers pour qu'ils soient « difficilement évitables » (R. W. Allen et al., 2011; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010), l'occurrence des erreurs est tout de même fortement dépendante du comportement du conducteur. Or, l'absence d'erreur dans une situation critique d'apprentissage pourrait ne pas être liée spécifiquement à l'efficacité des compétences des conducteurs. L'effet d'être en situation expérimentale par exemple, ou de conduire un simulateur pourrait augmenter la vigilance momentanée des conducteurs. Cependant, 5 études sur les 8 ne précisent pas les types de situations de danger potentiels qu'elles présentent à leurs apprenants. De plus, aucune étude n'indique les conséquences de ces situations en termes de collisions évitées ou subies par exemple. Pourtant, un tel indicateur permettrait d'évaluer les caractéristiques de la situation en termes de sévérité ou de maîtrise, deux dimensions importantes des situations critiques pour l'apprentissage (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016).

Une seconde limite est liée au traitement pédagogique de ces erreurs. En effet, immédiatement après une erreur potentielle, les conducteurs sont livrés à eux-mêmes pour comprendre sa signification, et identifier les compétences à améliorer pour l'éviter. Or, des travaux montrent que les novices sont peu conscients des dangers de la conduite, se retrouvant régulièrement dans des situations à risque, sans en avoir conscience (Higelé et al., 2011). Après le scénario d'entraînement, les conducteurs reçoivent systématiquement une explication générique de la situation. Cette explication arrive plusieurs minutes après la situation d'erreur potentielle et ne tient pas compte des caractéristiques des erreurs commises par les conducteurs dans la situation dangereuse. Or, ces erreurs sont potentiellement diverses, touchant aussi bien les compétences d'évaluation que de prise de décision et d'anticipation (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018).

Tableau 6, Formations « par simulateur »

Études *données no disponibles	Participants/ Conditions	Immersion du dispositif pour l'entraînement	Compétences entraînées Techniques (CT) Haut niveau (CHN)	Conception pédagogique			Modalités d'évaluation		Résultats •(Condition 1 VS. Condition 2)	Limites
				Activité hors simulateur	Scénarios, situations et tâches associées	Rétroactions				
Hoskovec and Stikar (1971)*	10 novices	Faible Mono écran	Passage de vitesse (CT)	Non	Répétition de situations de passage de vitesse	Non précisé	Route réelle	• Passage de vitesse	Amélioration des compétences techniques sur route réelle	Données non disponibles
Van Leeuwen et al. (2015)	52 novices (moy = 19 ans, d'apprenants à 3 ans de permis)	Moyenne : 3 écrans 180°	Virage (CT)	Non	4 scénarios répétés : Négociation de virage à 90°	Aucune	Simulateur – idem entraînement	Amélioration au fil des 4 sessions : • Déviation par rapport au milieu de la courbe (en m)	Amélioration des compétences (scénario 1 VS. Scénario 4) : Suivi de courbe plus précis (71cm VS. 52cm)	Apprentissage de suivi de courbe en simulateur, transférable à la route réelle ?
Falkmer & Gregersen (2003)*	54 Novices 18 – 3 écrans 120° 18 – mono écran 18 – contrôles (conduite encadrée)	Faible : Mono écran Moyenne : 3 écrans 120°	Virage (CT)	Vidéos explicatives : Négociation de virage Suivi d'un véhicule	Plusieurs scénarios comprenant des situations de : Négociation de virage (T) Suivi d'un véhicule (T)	Non précisé	Simulateur – idem entraînement	• Suivi de courbe • Maintien de distance de sécurité	Les Conducteurs 3 écrans sont meilleurs que les autres sur : Suivi de courbe Maintien de distance de sécurité	Conducteurs entraînés reçoivent également un entraînement vidéo aux compétences Contenu des scénarios de test non précisé
Cox et al. (2009)	20 Novices (moy = 16 ans, apprenants) 10 entraînés 10 contrôles	Moyenne : 3 écrans 180°	Virage (CT) Freinage (CT)	Non	4 scénarios : Difficulté progressive : Trafic faible → fort	Débriefing	Simulateur – idem entraînement	Situation simulée Score par compétence, évaluée par un formateur	Les conducteurs entraînés sont meilleurs sur : Virage (8,7 VS. -0,3) Freinage (5,4 VS. 0,3)	Faible effectif Contenu des scénarios d'entraînement non précisé Contenu des scénarios de test non précisé
Allen et al. (2003)	112 Novices (apprenants) 18 – mono écran 45 – 3 écrans 48 – pleine échelle	Faible : Mono écran Moyenne : 3 écrans 135° Haute : Pleine échelle	Virage (CT) Freinage (CT) Anticipation des danger (CHN)	Non	6 scénarios : Tâches de virage, freinage • Situations de dangers → erreur passive	Tableau de score	Simulateur – idem entraînement	• Nombre d'excès de vitesse	Conducteurs entraînés en simulateur 3 écrans et pleine échelle : Moins d'excès de vitesse (0,4 VS. 0,7)	Contenu des scénarios d'entraînement non précisé Contenu des scénarios de test non précisé Critères tableau de score non précisés

Allen et al. (2010)	554 Novices (idem) • 159 – pleine échelle • 180 – 3 écrans 135° • 215 – mono écran	Idem	Idem	Idem	Idem	Idem	Route réelle	Données de conduite réelle, 40 mois post entraînement • Accidents	Conducteurs entraînés en simulateur pleine échelle • Moins de collisions durant les 40 mois post permis (0,2% VS. 0,6%)	Contenu des scénarios de test non précisé Critères tableau de score non précisés Aucun test d'inférence
(Hirsch & Bellavance, 2016, 2017)	• 1120 novices (moy = 17,7 ans, apprenants) • 182 000 novices (moy = 18,2 ans)	Haute : • 360° • Base mouvante	Approche globale : L'ensemble des compétences sont traitées	Non	80+ scénarios d'entraînement différents : • CT (ex. virage, freinage) • CHN (ex. anticipation dangers) • Sélection au choix du formateur • 1 à 6h de formation	Non précisé	Route réelle	Données de conduite réelle, 24 mois post entraînement • Accidents • Infractions	Conducteurs entraînés : • Infractions : Effets positifs marginaux • Accident : Pas d'effet significatif	Contenu des scénarios d'entraînement non précisés Nombre d'heure de formation non précisé Participation sur base du volontariat
Allen et al. (2011)	67 Novices (apprenants) • 67 novices entraînés • Non entraînés (nombre non précisé)	Faible : • Mono écran	Anticipation des dangers (CHN)	Vidéos explicatives	12 leçons avec situations de danger : • Erreur passive	• Collision avec le danger	Simulateur – idem entraînement	Situations de conduite multiples, dont danger • Collisions • Excès de vitesse	Conducteurs entraînés : • Évitent plus de collisions (80% VS 63%) • Moins d'excès de vitesse (2,2 VS 4)	Nombre et caractéristiques des sujets contrôle non précisés Contenu des leçons de conduite non précisé
Wang et al. (2010)	32 participants hommes (<1000km d'expérience) • 16 entraînés • 16 non entraînés	Faible : • Mono écran	Anticipation des dangers (CHN)	1) Rejeu 2) Visionnage d'un comportement modèle	8 situations contenant des dangers : • Erreur passive	• Collision avec le danger • Rejeu des performances du prétest	Simulateur – idem entraînement	Situations de danger • Variations de vitesse à l'approche de zones de danger potentiel	Conducteurs entraînés : • Ralentissent plus à 40m du danger	Participants homme seulement Faible effectif
Ivancic & Hesketh (2000)	44 participants (moy = 20 ans) • 22 entraînés • 22 non entraînés	Faible : • Mono écran	Anticipation des dangers (CHN)	Non	5 situations contenant des événements à risque : • Erreur active	• Collision avec le danger	Simulateur – idem entraînement	Situations de danger • Nombre d'erreurs commises	Conducteurs entraînés : • Font moins d'erreurs	Qualification des erreurs peu claire
Vlakveld et al. (2011)	36 novices (moy = 19 ans, > 1 an d'expérience) • 18 entraînés • 18 non entraînés	Moyenne : • 3 écrans 135°	Anticipation des dangers (CHN)	1) Vidéos explicatives « vue du dessus » 2) tache d'identification de danger	Sim RAPT 10 situations contenant des dangers : • Erreurs passive	• Collision avec le danger • Explication « vue d'oiseau »	Simulateur – Pleine échelle	Situations de danger • Fixations oculaires sur des zones de danger potentiel	Conducteurs entraînés : • Fixent les zones de danger potentielles 20% plus souvent	Faible effectif

Enfin, une troisième limite est que les échantillons utilisés par ces études sont hétérogènes, allant d'apprenants à des conducteurs ayant le permis depuis plus d'un an (Vlakveld et al., 2011). Or, la décroissance du surrisque est maximale durant les 6 à 8 premiers mois post examen (Mayhew, Simpson, & Pak, 2003; McCartt et al., 2003). Par conséquent, les mêmes situations dangereuses sont susceptibles d'être vécues de façon différente par des conducteurs qui diffèrent de façon non négligeable en termes de maîtrise de la conduite. De plus, toutes ces études sauf une traitent de la question de l'expérience de conduite par le biais d'un contrôle de l'âge, ou du temps depuis l'examen. Or, ni l'un ni l'autre ne reflètent le kilométrage parcouru ou les habitudes de conduite, pourtant déterminants dans l'expérience de conduite (McDonald et al., 2015).

4.2.2.3 *Acquisition des compétences d'anticipation des dangers par un dispositif « non-immersif » ou tiers*

Sept études utilisent un dispositif d'apprentissage non immersif ou tiers (ex. ordinateur, conduite commentée) pour l'acquisition des compétences d'anticipation des dangers (voir tableau 7).

Plusieurs approches pédagogiques sont utilisées. L'approche la plus courante consiste à présenter des situations contenant des dangers sous la forme de séquences de photographies, d'images en « vue d'oiseau » ou de vidéos, présentées sur ordinateur (Divekar et al., 2013; Fisher et al., 2002; Fisher, Pollatsek, & Pradhan, 2006; Oron-Gilad & Parmet, 2014; Petzoldt, Weiß, Franke, Krems, & Bannert, 2013; Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006). Cette exposition se poursuit par une tâche d'identification des zones de danger potentielles ou des actions à effectuer pour éviter un tel danger. Parmi ce type de formation, le programme RAPT (*Risk Awareness Perception Training*, voir figure 14) est le plus couramment représenté dans la littérature (Goode et al., 2013; McDonald et al., 2015; Unverricht et al., 2018). Il propose 9 situations dangereuses, sous la forme de séquences ordonnées de photographies, d'images en vue d'oiseau ou de vidéos, à des conducteurs novices. Dans un premier temps, ces derniers doivent cliquer sur des zones à risques dans la scène visuelle, au moyen d'une souris. Puis, suivait une phase de présentation exocentrique en « vue d'oiseau » de chaque situation, accompagnée d'explications à propos des risques qu'elle comporte. Après cette phase d'explication, une comparaison est effectuée entre la réponse initiale de l'apprenant et la réponse attendue.

D'autres approches plus rares comprennent un entraînement à la conduite commentée (Crundall et al., 2010) ou le visionnage d'une vidéo de conduite simulée accompagnée d'une tâche secondaire (Divekar et al., 2013). Par exemple, dans l'étude de Crundall et al., (2010), après une évaluation initiale en simulateur, des conducteurs recevaient un entraînement à la conduite commentée par des enseignants de la conduite spécialisés. Puis, ils participaient à une session de 2h de conduite encadrée, durant laquelle il devait produire un commentaire détaillé de leur propre comportement. Ils repassaient alors un test en conduite simulée pour évaluer les effets de la formation. Dans l'étude de Divekar et al., (2013), une première tâche consistait à regarder une vidéo de conduite, tout en repérant à l'aide d'une carte géographique les noms des rues empruntées. Dans un second temps, la vidéo de conduite était rejouée aux conducteurs, mais cette fois sans la carte. Durant les moments pendant lesquels le conducteur regardait la carte dans la première tâche, la vidéo était occultée pour signaler aux conducteurs qu'ils étaient alors dans l'incapacité de percevoir des éléments d'intérêt dans la situation.

Tableau 7, Formations dispensées par un biais tiers

Études	Participants/ conditions	Dispositif	Compétences entraînées	Conception pédagogique		Types de simulateur et modalités utilisés pour l'évaluation		Résultats	Limites
				Approches	Rétroactions				
Pradhan et al. (2006)	32 novices (moy = 16 ans, apprenants) • 12 entraînés • 12 non entraînés	Ordinateur	Anticipation des dangers (CHN)	RAPT Photographie et « vue du dessus » de scénarios contenant un danger : • Identification de dangers potentiels	• Bonnes réponses	Pleine échelle	Situations de danger • Fixations oculaires sur des zones de danger potentiel	Conducteurs entraînés : • Fixent les zones de danger potentielles 20 à 30% plus souvent	Faible effectif
Pollatsek et al. (2006)	48 novices (moy = 16,5 ans, apprenants) • 24 entraînés • 24 non entraînés	Ordinateur	Anticipation des dangers (CHN)	Idem	Idem	Idem	Idem	Idem	
Petzoldt et al. (2013)	36 novices (moy = 17,4 ans, apprenants) • 12 entraînés • 13 placebos • 11 non entraînés	Ordinateur	Anticipation des dangers (CHN)	2 sessions de 13 séquences vidéo contenant des situations de danger, • Identification de dangers potentiels	• Bonne réponse	3 écrans 135°	Situations de danger • Vitesse de fixation des dangers	Conducteurs entraînés : • Fixent les dangers jusqu'à 3s plus rapidement	Faible effectif Résultats non significatifs sur plusieurs situations test
Oron Gilad et parmet (2014)	39 novices (17-18 ans, < 3 mois d'expérience) • Entraînement 1 • Entraînement 2 • RAPT	Ordinateur	Anticipation des dangers (CHN)	<u>Entraînement 1</u> : 63 clips vidéo de situations de danger, • Identification de dangers potentiels <u>Entraînement 2</u> : Explications vidéo + Entraînement 1 <u>Entraînement 3</u> : RAPT	Non précisé	Pleine échelle	Situations de danger • Variations de vitesse à l'approche de zones de danger	Conducteurs entraînés : • Ralentissent plus à l'approche du danger	Rétroaction non précisée Pas de différences significatives inter-groupes Répartition des effectifs non précisée
Fisher et al. (2002)	45 participants • 15 Lycéens (16-17 ans) entraînés • 15 Lycéens (16-17 ans) non entraînés • 15 étudiants (permis obtenu) non entraînés	Ordinateur	Anticipation des dangers (CHN)	80 clips vidéo de situations de trafic : • Identification de dangers potentiels • Identification de comportements appropriés	Non précisé	Mono écran	Situations de danger • Variations de vitesse à l'approche de zones de danger	Conducteurs entraînés : • Ralentissent plus à l'approche du danger	Faible effectif Rétroaction non précisée Différences entraînés / Non entraînés non significatives
Divekar et al. (2013)	32 novices (16 à 18 ans, apprenants) • 20 entraînés • 20 non entraînés	Ordinateur	Anticipation des dangers (CHN)	1) Vidéo de conduite + tâche secondaire, identifier les noms de rue sur une carte 2) rejeu de la vidéo avec occlusions des moments de regards carte 3) étape 1)	• Rejeu avec occlusion	Pleine échelle	Situations de conduite + tâche de distraction • Durée du regard sur la distraction	Conducteurs entraînés : • Regarde moins longtemps les distractions (2,4s VS. 3s)	
Crundall et al. (2010)	40 novices (17 à 25 ans, apprenants) • 24 entraînés • 16 non entraînés	Conduite commentée	Anticipation des dangers (CHN)	Entraînement à la conduite commentée, encadrée par un formateur	• Non	3 écrans 90°	Situations de danger • Collisions Variations de vitesse à l'approche de zones de danger	Conducteurs entraînés : • Subissent moins de collisions (1 VS. 1,6) • Ralentissent plus à 40m du danger	

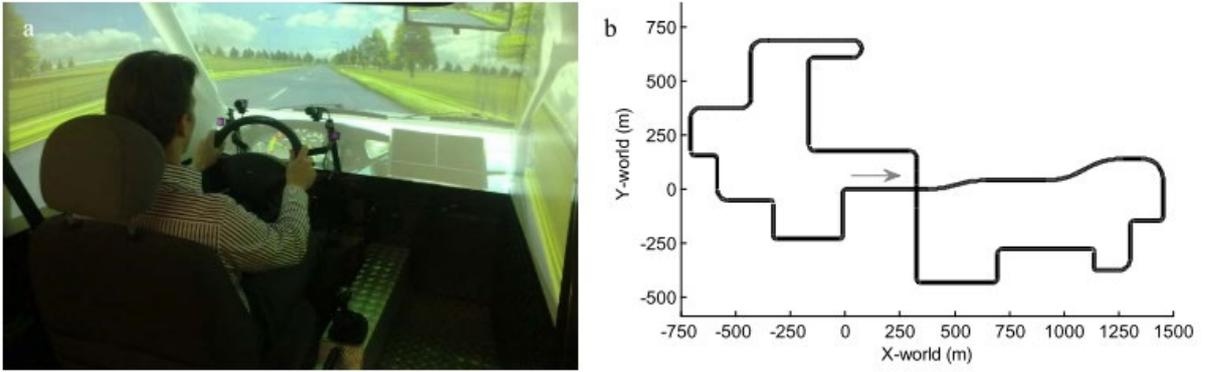


Figure 11, dispositif utilisé par Van Leeuwen et al., (2015). A gauche le simulateur moyenne fidélité utilisé, à droite le circuit d'entraînement. Tiré de Van Leeuwen et al., (2015)

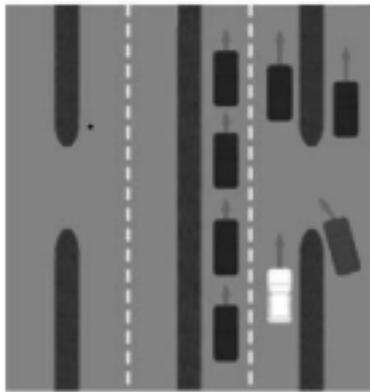


Figure 12, exemple de situation « par erreur » passive. En blanc, la voiture de l'apprenant – tiré de Wang et al. (2010)

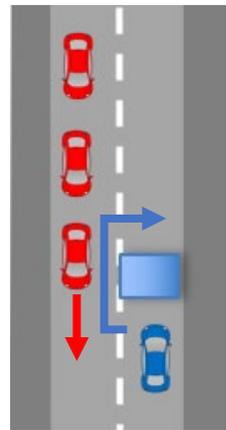


Figure 13, exemple de situation « par erreur » active. En bleu, la voiture de l'apprenant – tiré de Ivancic & Hesketh (2000)

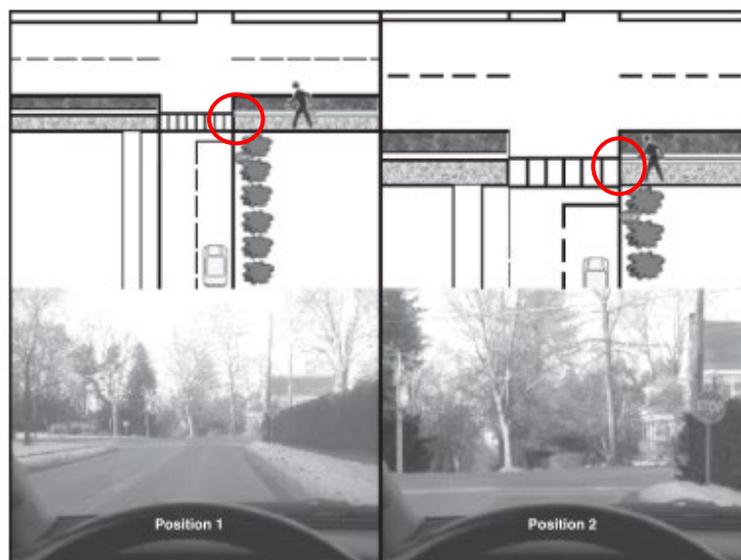


Figure 14, tâche d'identification de dangers dans le cadre du RAPT. Cercles rouges : zones à identifier par les apprenants – tirée de Pradhan et al. (2006)

4.2.3 Quelle efficacité des formations sur simulateurs

Dans les travaux que nous avons recensés, l'efficacité des formations aux compétences de conduite est évaluée selon deux approches (Goode et al., 2013).

La première s'appuie sur une évaluation de l'acquisition des compétences ciblées, effectuée en simulateur. Les modalités d'évaluation précises sont présentées en détail et discutées dans le chapitre 5.

Quinze études sur les 18 recensées utilisent cette approche. Sur ces 15 études, 2 ciblent uniquement les compétences techniques et 13 ciblent les compétences d'anticipation des dangers. Les simulateurs à haut niveau d'immersion pour l'évaluation sont les plus courants. En effet, 6 études sur 15 utilisent des simulateurs pleine échelle. Six également utilisent des simulateurs 3 écrans. Enfin 4 études utilisent un simulateur mono-écran.

La seconde approche s'appuie sur les données de sécurité routières réelles (ex. nombre d'accidents, nombre d'infractions sur une période donnée, etc.) concernant les conducteurs (Beanland et al., 2013; Moreno-Roldán et al., 2018).

4.2.3.1 L'évaluation de l'apprentissage au moyen du simulateur

1.1.1.1.1 Des travaux qui suggèrent une efficacité du simulateur pour l'apprentissage des compétences techniques

Trois études utilisent le simulateur pour évaluer l'efficacité d'un entraînement « par simulateur » aux compétences techniques. Van Leeuwen et al. (2015) comparent ainsi l'évolution des performances de suivi de courbe de conducteurs novices au fil de quatre sessions répétées de conduite sur simulateur. Ils montrent qu'à la 4^{ème} session, les conducteurs dévient de 20cm de moins par rapport au milieu de la courbe, en comparaison de la première session. De façon comparable, après un entraînement à une tâche de suivi de courbe, Falkmer & Gregersen, (2003) constatent une amélioration des compétences techniques de virage.

Une limite principale concerne la transférabilité de ces compétences à la route réelle. En effet, les simulateurs utilisés par les auteurs sont à base fixe et à immersion moyenne au mieux. Par conséquent, le conducteur voit ses compétences techniques améliorées dans un environnement qui ne présentent pas les mêmes contraintes physiques, sensori-motrices et visuelles que la conduite réelle (Klüver et al., 2016).

1.1.1.1.2 Efficacité des formations aux compétences d'anticipation des dangers

A notre connaissance, aucune revue ne compare l'efficacité des approches formatives « par simulateur » et des approches formatives dispensées par un autre biais (ordinateur, conduite commentée) pour la formation aux compétences d'anticipation des dangers. Or, parmi les 12 études recensées ciblant les compétences d'anticipation des dangers, 5 utilisaient le simulateur à des fins d'apprentissage, alors que 7 utilisaient un autre biais que le simulateur pour l'apprentissage.

Pour l'évaluation en simulateur, toutes sauf une (qui ne précise pas ses conditions d'évaluation) utilisent comme approche évaluative la confrontation des conducteurs avec des situations de danger potentiel. Dans ce cadre, plus d'un tiers des études recueillaient des données oculométriques liées détection visuelle de dangers ou de zones dangereuses (5/13). Un grand nombre recueillait également les ralentissements de l'allure à l'approche des zones de danger potentiel (4/13). Des données plus rares comprennent les collisions entre le conducteur et le danger potentiel (2/13), le nombre d'excès de vitesse (2/13), le nombre d'erreur commises (1/13), ou un score évalué par un formateur (1/13).

L'efficacité d'une formation usant du simulateur pour l'apprentissage apparaît à première vue comparable à l'efficacité d'une approche utilisant un ordinateur ou un autre biais. En effet, confrontés à des situations comportant des dangers potentiels, les conducteurs entraînés par les deux types d'approche détectent visuellement plus souvent et plus rapidement les dangers et zones de danger potentielles. Par ailleurs, ils ralentissent davantage à l'approche de zones de danger potentiel, et font moins d'excès de vitesse, moins d'erreurs et évitent plus de collisions avec les dangers potentiel.

Toutefois, les méthodologies et procédures des études actuelles utilisant le simulateur pour évaluer l'apprentissage ne permettent pas, à notre sens, d'évaluer le potentiel du simulateur utilisé à des fins d'exposition des conducteurs. En effet, nous avons vu que l'approche « par erreur » démontrait plusieurs limites susceptibles d'en limiter l'efficacité. Par ailleurs, toutes ces études sauf une (Ivancic & Hesketh, 2000) proposent une phase d'explication supplémentaire différée. Cette phase d'explication est identique aux phases d'explications proposées dans les formations n'utilisant pas le simulateur à des fins pédagogiques (ex. entraînement par ordinateur). Par conséquent, les résultats comparables entre les deux approches pourraient être expliqués en majorité par l'efficacité de la phase d'explication différée, commune aux deux approches.

4.2.3.2 L'évaluation de l'apprentissage sur route réelle

Trois études évaluent l'efficacité d'une formation dispensée « par simulateur » au moyen de données caractérisant la conduite sur route réelle, confirmant de fait la rareté d'une telle approche (Beanland et al., 2013; Goode et al., 2013; Moreno-Roldán et al., 2018).

Une seule étude parmi celles-ci évalue l'efficacité d'une formation aux compétences techniques (Hoskovec & Stikar, 1971). Les auteurs rapportent une amélioration des compétences de passage de vitesse sur route, sans toutefois décrire précisément les conditions exactes d'évaluation.

Les deux autres évaluent des formations ciblant les compétences techniques et d'anticipation des dangers (R. W. Allen et al., 2010; Hirsch & Bellavance, 2017). Ces deux études mesurent l'efficacité des apprentissages en recensant les infractions ou accidents expérimentés jusqu'à près de 3 ans après l'obtention du permis de conduire. Ces travaux montrent des résultats mitigés. Dans l'étude de Allen et al. (2010), les auteurs évaluent l'efficacité d'un apprentissage des compétences d'anticipation des dangers en fonction du type de simulateur utilisé (voir figure 15). Les résultats montrent que 40 mois après l'entraînement, les novices entraînés en simulateur pleine échelle ont expérimentés 3 fois moins d'accidents que des novices entraînés en simulateur mono écran ou par un entraînement traditionnel. Au contraire, dans l'étude de Hirsch et Bellavance (2017), aucun effet de l'entraînement n'est constaté sur l'accidentalité des conducteurs novices, 24 mois après l'entraînement. Toutefois, les auteurs constatent une baisse des infractions, qui n'apparaît toutefois qu'à partir du 6ème mois de conduite autonome.



Figure 15, dispositif utilisé par Allen et al., (2010). De gauche à droite, simulateur mono-écran, 3 écrans, pleine échelle

Cependant, ces résultats sont à nuancer. En effet, de nombreuses limites caractérisent ces deux études. Dans l'étude de Allen et al. (2010), malgré un échantillon conséquent (159 conducteurs entraînés en simulateur pleine échelle, 180 en simulateur 3 écrans) aucun test d'inférence statistique n'est utilisé pour confirmer la différence d'accidentalité constatée. De plus, aucune des deux études ne répartissait les conducteurs de manière aléatoire dans les conditions expérimentales. En effet, ils étaient sélectionnés sur la base du volontariat, causant un potentiel biais de motivation (Beanland et al., 2013; Moreno-Roldán et al., 2018). Par ailleurs, l'effet de l'entraînement était mesuré jusqu'à plusieurs années après ce dernier. Or, le surrisque des novices diminue fortement durant les 6 à 8 premiers mois post-permis (Government Queensland, 2005; Mayhew, Simpson, & Pak, 2003; McCartt et al., 2003). Une telle diminution peut signifier qu'outre l'entraînement « par simulateur », l'apprentissage « sur le tas » de la conduite autonome pourrait avoir supplanter les effets évalués plusieurs années après avoir été dispensés.

Outre les limites méthodologiques précitées, aucune des deux études ne décrit clairement et extensivement le contenu exact des scénarios utilisés pour l'entraînement. Ainsi dans Hirsch et Bellavance (2017) plus de 80 scénarios différents sont proposés pour la formation des conducteurs, sans qu'aucun ne soit détaillé par les auteurs. Ces derniers déclarent cibler l'intégralité des compétences de conduite spécifiées par la matrice GDE (Assailly, 2013; Hatakka et al., 2002). Cependant, les contenus réellement mobilisés peuvent être sélectionnés au bon vouloir des formateurs responsables de l'organisation de la formation. De plus, chaque conducteur entraîné pouvait suivre entre 1 et 6 heures d'entraînement simulé. Par conséquent, malgré un échantillon de plus de 1000 conducteurs entraînés, chacun d'entre eux était susceptible d'avoir suivi une formation « par simulateur » significativement différente des autres conducteurs.

Nos résultats rejoignent par conséquent les conclusions des revues existantes, concernant l'impossibilité d'évaluer l'efficacité réelle de l'entraînement « par simulateur » sur la conduite réelle (Beanland et al., 2013; McDonald et al., 2015; Moreno-Roldán et al., 2018). Ces revues centrent principalement leurs critiques sur les limites méthodologiques des études. Notre revue ajoute à ces critiques l'importance du contrôle du contenu de l'enseignement proposé. En effet, l'apprentissage et l'implication des compétences de conduite dans la sécurité du conducteur n'est pas uniforme (Brehmer, 1994; Williams, 2013). Les compétences perceptives et cognitives sont fortement impliquées dans l'accidentalité des novices, au contraire des compétences techniques (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018). Pourtant, dans Hirsch et Bellavance (2016, 2017), seuls 2 scénarios sur les 10 les plus choisis (43% des scénarios choisis par les formateurs au total) ciblent l'anticipation des dangers (intersection : 4% et piétons : 3,8%). Les scénarios les plus choisis ciblent les compétences techniques de virage, avec 10% des scénarios choisis au total.

4.3 Un focus sur les rétroactions formatives

Une rétroaction formative désigne toute information émise par une entité tierce (instructeur, simulateur) en direction d'un apprenant, dans le but d'améliorer son comportement ou ses connaissances pour la réalisation d'une tâche (Hattie & Timperley, 2007; Kluger & DeNisi, 1996; Shute, 2008). Nous proposons ici une analyse supplémentaire des formations aux compétences de conduite perceptives et cognitives recensées précédemment, sous le prisme des modalités de rétroactions formatives utilisées, afin de dégager des pistes pour l'amélioration des dispositifs de formation « par simulateur ».

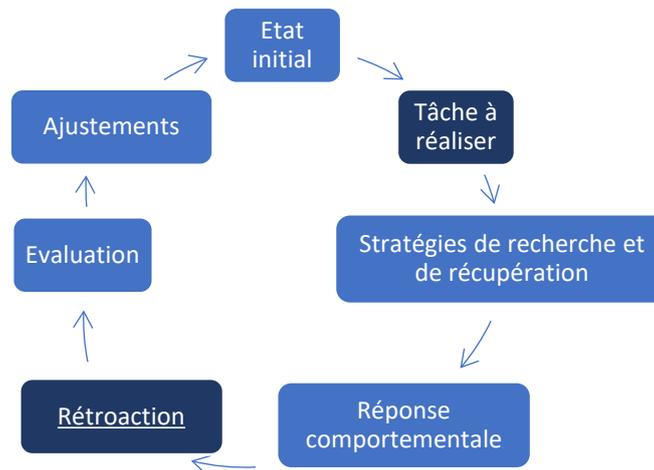


Figure 16, cycle de l'apprentissage de l'apprenant recevant une rétroaction, tiré de Shute (2008) et Bangert-Drowns et al., (1991)

4.3.1 Les rétroactions formatives, essentielles pour favoriser l'apprentissage expérientiel

Shute (2008), sur la base des travaux de Bangert-Drowns et al., (1991), propose un processus cyclique en 5 étapes décrivant l'implication des rétroactions formatives dans l'apprentissage (voir figure 16). Il indique que ces « 5 étapes sont similaires aux autres cycles de l'apprentissage [dont l'apprentissage expérientiel décrit par D. A. Kolb, (1984)], en particulier quant à l'importance de la réflexion » (Shute, 2008, p.171).

Les connaissances à priori et les buts de l'apprenant définissent l'état initial. Confronté à une tâche spécifique, le conducteur met en place des stratégies de recherche et de récupération pour mobiliser de façon adéquate les compétences nécessaires à la tâche. En conduite, il s'agirait notamment des schémas de situations nécessaires à l'évaluation de la situation et à la prise de décision.

Ensuite, le conducteur produit une réponse comportementale. Sur cette base, l'environnement réel ou simulé fournit une rétroaction à l'apprenant. Cette rétroaction fournit les bases de « l'observation réflexive » qui précède l'abstraction des règles de la situation. Dans le cycle il s'agit alors de l'étape d'évaluation de la réponse, au regard des informations fournies par les rétroactions. Sur la base de cette abstraction, l'apprenant établit alors des ajustements, ce qui modifie l'état initial et améliore la performance.

Les simulateurs pour l'apprentissage mettent en œuvre une multitude de rétroactions formatives différentes, parfois de façon hétérogène et avec des résultats contrastés (Beanland et al., 2013; Hattie & Timperley, 2007; McDonald et al., 2015). Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux caractéristiques et à l'efficacité générale des différentes modalités de

rétroactions formatives pour l'apprentissage des compétences. Dans un second temps, nous nous intéresserons à une caractéristique des rétroactions faisant l'objet de peu de travaux de recherche : l'insertion de la rétroaction dans la narration de la situation d'apprentissage. En particulier, nous présenterons les caractéristiques des rétroactions de ce type pouvant être retrouvées dans les formations aux compétences de conduite utilisant le simulateur.

4.3.2 *Caractéristiques modulant l'efficacité des rétroactions formatives*

Dans une synthèse générale de la littérature, Shute (2008) identifie plusieurs caractéristiques modulant l'efficacité des rétroactions pour l'apprentissage : la spécificité, la complexité (ou élaboration) et la temporalité.

4.3.2.1 *Spécificité de la rétroaction*

La spécificité d'une rétroaction caractérise la qualité des informations qu'elle fournit, pour l'apprentissage de la tâche. Plus ces informations indiquent clairement à l'apprenant comment il doit améliorer ses stratégies ou son comportement pour réaliser efficacement la tâche, plus elles sont spécifiques. Plus une rétroaction est spécifique, plus elle est efficace (ex. Bangert-Drowns et al., 1991). En effet, l'efficacité des rétroactions formatives passe par leur capacité à signaler à l'apprenant les défaillances des compétences, tout en fournissant des informations utiles sur la façon de les combler. La spécificité est directement liée à la complexité de la rétroaction.

4.3.2.2 *Rétroaction simple vs. élaborée*

La complexité oppose des rétroactions formatives simples à des rétroactions formatives élaborées. Une rétroaction simple désigne « la fourniture de l'information sur le caractère correcte ou non de la réponse, [ou] la fourniture à l'apprenant de la réponse correcte » (Burkhardt, Cabon, Corneloup, Delgoulet, Luengo, et al., 2016, p.22). Ce type de rétroaction apparaît efficace pour l'apprentissage de compétences élémentaires (Kluger & DeNisi, 1996; Van der Kleij, Feskens, & Eggen, 2015). Par opposition, une rétroaction élaborée signifie que « l'information donnée va largement au-delà de celle délivrée dans le cas de la rétroaction simple, par exemple en donnant des explications, en ajoutant des exemples, etc. » (Burkhardt, Cabon, Corneloup, Delgoulet, Luengo, et al., 2016, p.23). Cette méthode apparaît globalement la plus efficace, en particulier pour ce qui concerne les apprentissages des compétences de haut niveau (Shute, 2008; Van der Kleij et al., 2015).

4.3.2.3 *Proximité temporelle entre situation et rétroaction*

Le temps séparant la rétroaction de la situation d'apprentissage caractérise la proximité temporelle de la rétroaction. Une rétroaction peut être concomitante d'un événement (immédiate) ou en être temporellement éloignée (différée) (Shute, 2008; Van der Kleij et al., 2015). Une rétroaction immédiate est administrée au sujet, juste après la rencontre avec l'évènement d'où la difficulté dans la situation d'apprentissage (Van der Kleij et al., 2015). Il existe une hétérogénéité dans la littérature concernant le moment d'administration d'une rétroaction différée. Celle-ci peut en effet s'étendre de quelques secondes à plusieurs mois après la tâche d'apprentissage (Van der Kleij et al., 2015).

Burkhardt, Cabon et al., (2016, p.23) notent que « l'efficacité comparée entre rétroaction immédiate et rétroaction différée donne lieu à des résultats contrastés. Elle semble se différencier selon l'approche de l'étude et le contenu ciblé d'apprentissage. ». Shute note ainsi que les « rétroactions immédiates démontrent une supériorité face aux rétroactions différées dans le cadre de l'apprentissage [...] de compétences procédurales et motrices » (Shute, 2008, p.164). Dans le cadre de prises de décision en situations dynamique, un effet similaire est retrouvé (Diehl & Serman, 1995).

Cependant, l'auteur ajoute également que « les rétroactions différées se montrent parfois aussi efficaces que les rétroactions immédiates » (Shute, 2008, p.164). En particulier, les rétroactions différées diminueraient l'interférence entre l'action inadaptée ayant amené la rétroaction et l'action adaptée à apprendre (Kulhavy & Anderson, 1972). Dans ce cadre, Burkhardt, Cabon et al., (2016 – p.24) signalent que « des apprenants engagés dans l'apprentissage d'une tâche simple bénéficieraient plus de la délivrance de la rétroaction à la fin de la tâche, tandis que dans le cas d'une tâche complexe, ils seraient plus aidés par un feedback simultané (Wulf & Shea, 2004). »

4.3.3 La question de la cohérence narrative des rétroactions formatives

À notre connaissance, l'insertion de la rétroaction dans la narration de la situation d'apprentissage ne fait l'objet que de très peu de travaux de recherche. Cette insertion dans la narration est abordée au travers de la notion de « cohérence narrative » ou encore d'insertion dans la « diégèse ». La diégèse désigne « tout ce qui est censé se passer, selon la fiction que présente [la tâche] ; tout ce que cette fiction impliquerait si on la supposait vraie » (Souriau & Souriau, 1990, p.581). Toute rétroaction apportée dans un contexte de formation peut ainsi s'inscrire soit dans le cadre du récit vécu par l'apprenant dans la simulation en cours, soit lui être extérieure. Ces deux cas renvoient respectivement aux rétroactions formatives intradiégétiques ou extradiégétiques (Cecchi, 2010; Kirby, 1991; Salomoni et al., 2017).

4.3.3.1 Rétroactions formatives intradiégétiques

Une rétroaction est intradiégétique lorsqu'elle s'insère dans la diégèse de la simulation, c'est à dire qu'elle appartient à tout moment à l'univers narratif de l'environnement simulé. Par exemple, dans une situation de conduite où intervient la traversée inopinée d'un piéton hors d'un passage clouté, les conséquences de cet événement, en termes d'accident ou de presque accident par exemple, constituent une rétroaction intradiégétique. Une approche intradiégétique pourrait renforcer l'immersion de l'apprenant dans la situation simulée (Salomoni et al., 2017). En effet, l'insertion de la rétroaction dans la narration de la situation rapprocherait le conducteur de l'expérience vécue d'une situation de conduite – ou d'apprentissage de la conduite – réaliste. La fidélité comportementale de la situation serait alors augmentée, améliorant en conséquence les apprentissages y prenant place (R. W. Allen, Park, Cook, & Fiorentino, 2007; Beanland et al., 2013; Falkmer & Gregersen, 2003). Par conséquent, les rétroactions intradiégétiques s'inscrivent directement dans les mécanismes d'apprentissage expérientiel mis en œuvre par les novices durant les premiers temps de la conduite autonome (Mayhew, Simpson, & Pak, 2003; McCartt et al., 2003).

Des rétroactions intradiégétiques sont retrouvées dans l'intégralité des formations « par simulateur » aux compétences d'anticipation des dangers (Allen et al., 2011, 2003; Cox et al., 2009; Ivancic & Hesketh, 2000; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). En effet, ces formations proposent au conducteur d'apprendre par la confrontation à des situations contenant un danger. Les rétroactions y sont ainsi simples et immédiates au sens où elles sont constituées du résultat de l'action du conducteur face à cette situation dangereuse. Ce résultat peut être une erreur, et consister alors en une collision ou une presque collision, ou une réussite, si le conducteur adopte le bon comportement pour éviter le danger. Le résultat de l'action fournit ainsi une information rétroactive susceptible de faciliter l'apprentissage des compétences défaillantes, ou de renforcer les compétences efficaces (Frese, 1995; Ivancic & Hesketh, 2000).

Cependant, les rétroactions intradiégétiques possèdent plusieurs limites. Elles peuvent être non systématiques, difficiles à standardiser, peu spécifiques et très dépendantes de l'expérience de l'apprenant (Hirsch & Bellavance, 2017; Kuiken & Twisk, 2001). En effet, ces rétroactions ont par définition lieu dans un environnement virtuel qui laisse une marge de manœuvre importante aux conducteurs. Prenons par exemple 2 conducteurs novices ayant

obtenu leur permis en même temps et ayant conduit le même nombre de kilomètres. Ces deux conducteurs sont confrontés en simulateur à la même situation de danger potentiel figurant un camion, cachant la vue sur le début d'un passage piéton. A l'approche du conducteur, un piéton surgit brusquement de l'arrière du camion (Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006; Vlakveld et al., 2011). Les deux conducteurs pourraient conduire à des vitesses différentes. De ce fait, le danger dans la situation pourrait s'y manifester différemment. Il pourrait se manifester de manière brutale pour un conducteur arrivant rapidement au lieu du danger potentiel, mais être tout à fait évitable par un conducteur lent, même si ce dernier ne possède pas de bonnes compétences d'anticipation des dangers. De plus, même dans le cas d'une « erreur », le caractère informatif de la rétroaction sur la performance pourrait ne pas être perçu par ces derniers. En effet, Higélé, Sieffer, & Hernja, (2011) notent que les novices sont inconscients de la majorité des situations de danger réellement rencontrées. Toutefois, à l'exception d'une seule étude (Ivancic & Hesketh, 2000), l'intégralité des études utilisant cette modalité de rétroaction la combine avec des rétroactions extradiégétiques (Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010) ou des explications a priori sur les compétences (R. W. Allen et al., 2011).

4.3.3.2 *Rétroactions formatives extradiégétiques*

Les rétroactions extradiégétiques se positionnent en dehors de l'univers narratif dans lequel l'apprenant est immergé durant la simulation. Par conséquent, elles sont systématiquement différées par rapport à la situation d'entraînement. Par exemple, il s'agit de présenter un message textuel sur l'écran à la suite de l'apparition et la non-détection d'un danger. Une approche extradiégétique satisfait plus facilement aux critères d'efficacité des rétroactions formatives pour l'apprentissage (Shute, 2008; Van der Kleij et al., 2015). Elle permettrait de fournir à l'apprenant des informations spécifiques, élaborées, à une temporalité immédiate ou différée en fonction des besoins. Il est en effet plus facile de proposer un message directif précis, élaboré et immédiat, en ne respectant pas les contraintes de la narration imposée par l'univers simulé. Cependant, ce type de rétroaction n'est a priori pas écologique. Il pourrait donc amoindrir l'immersion de l'apprenant.

Dans le cadre de la formation à la conduite, les rétroactions extradiégétiques prennent plusieurs formes, et peuvent être retrouvées dans la grande majorité des protocoles d'entraînement « par simulateur » ou elles sont associées à des rétroactions intradiégétiques. Elles sont composées d'explications concrètes différées des situations rencontrées par les conducteurs et des comportements à y adopter pour les maîtriser. Les rétroactions extradiégétiques les plus courantes sont les explications par changement de point de vue et le rejeu. Ces rétroactions peuvent être adaptées aux performances du conducteur, comme dans les rejeu (R. W. Allen et al., 2010; Divekar et al., 2013; Wang et al., 2010). Alors que d'autres sont similaires pour tous les conducteurs, comme dans les explications en « vue du dessus » (Fisher et al., 2006; Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006; Vlakveld et al., 2011).

Les explications par changement de point de vue sont des rétroactions spécifiques et élaborées (voir figure 17). Dans un premier temps, les conducteurs réalisent une tâche d'identification des dangers sur photos ou clips vidéos (Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006), ou de maîtrise de situations de danger sur simulateur (Vlakveld et al., 2011). Puis, les situations rencontrées leur sont représentées en « vue d'oiseau », accompagnées d'explications détaillées concernant les risques de la situation et les bons comportements à y adopter pour les éviter. Par exemple, dans l'étude de Vlakveld et al. (2011), après une phase d'apprentissage « par erreur » passive, une vidéo présente une « vue du dessus » des situations de danger rencontrées. Lors de cette vidéo, les mouvements des autres véhicules sont simulés alors qu'une voix-off détaille les risques inhérents à la situation. Puis une seconde vidéo présente les comportements à adopter dans la situation pour y neutraliser les dangers.

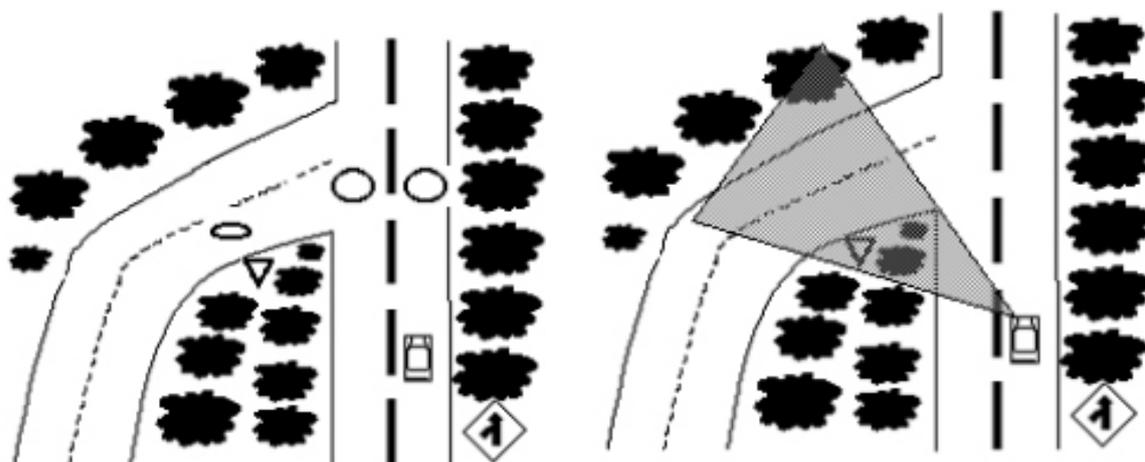


Figure 17, exemple de rétroaction extradiégétique en « vue du dessus ». à gauche, les zones à risques de la situation représentées par des cercles. A droite, la zone « aveugle » susceptible de cacher un danger dans la situation. Des explications en voix-off peuvent compléter ces informations graphiques – tiré de Pollatsek et al. (2006).

Dans le rejeu, les conducteurs sont soumis dans un premier temps à une tâche d'apprentissage en simulateur ou en vidéo. Puis, leurs performances à cette tâche leur sont rediffusées. Cette rediffusion peut être simple (Wang et al., 2010) ou élaborée (Agrawal, Knodler, Fisher, & Samuel, 2017; Divekar et al., 2013). Par exemple, dans l'étude de Wang et al. (2010), après une situation d'apprentissage « par erreur » passive en simulateur, leurs performances leur sont immédiatement rejouées sans aucune explication supplémentaire (Wang et al., 2010). Au contraire, dans l'étude de Divekar et al., (2013), la rétroaction est élaborée. En effet, dans une tâche d'entraînement, le temps passé à regarder la scène de conduite vidéo ou la carte géographique était enregistré. Dans la phase de rétroaction, des vidéos des scènes de conduite leur sont rediffusées. Ces vidéos mettent l'accent (soit par une occultation de la scène, soit par la présence d'un chronomètre très visible), sur les moments où le conducteur regardait la carte et pas la scène de conduite. Un texte apparaissait ensuite pour expliquer l'importance de ne pas quitter la route des yeux lors de la conduite.

D'autres rétroactions extradiégétiques simples proposent au conducteur l'affichage d'un score concernant la négociation de plusieurs situations dangereuses de conduite. Ce score était basé sur le nombre de danger évité, le nombre de contraventions reçues ou l'utilisation adéquate du clignotant. Si les conducteurs obtenaient le score minimal, ils pouvaient passer à l'étape suivante de l'entraînement. Certaines incluent par exemple une pause d'une séquence vidéo en « vue du conducteur » au milieu d'une scène routière pour poser des questions au participant (Petzoldt et al., 2013). Si la réponse est juste, la séquence continue, sinon elle se répète. D'autres encore proposent une exposition répétée à plusieurs scénarios sur ordinateur pouvant contenir un danger, sans qu'aucune rétroaction ne soit fournie à l'apprenant (Oron-Gilad & Parmet, 2014; van Leeuwen et al., 2015).

4.3.4 Une efficacité relative difficile à établir

Les rétroactions extradiégétiques apparaissent efficaces pour l'entraînement des conducteurs. En effet, les conducteurs ayant reçu une telle rétroaction durant leur formation détectent visuellement plus de zones de danger potentiel (Agrawal et al., 2017; Fisher et al., 2006; Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006; Vlakveld et al., 2011) et ralentissent davantage avant d'arriver sur les lieux de danger potentiel (Wang et al., 2010). L'efficacité des rétroactions intradiégétiques est actuellement impossible à évaluer. En effet, la majorité des études engageant une rétroaction intradiégétique les associe à une rétroaction

extradiégétique. Or, les modalités extradiégétiques associées aux rétroactions intradiégétiques « par erreur », sont hétérogènes. Elles peuvent être simples, sous la forme de tableaux de scores par exemple, ou élaborées, sous la forme d'une explication détaillée en « vue du dessus », ou d'un jeu associé à des explications supplémentaires.

Par ailleurs, une seule étude utilise les rétroactions intradiégétiques sans qu'elles soient associées à des explications a priori ou à des rétroactions extradiégétiques supplémentaires (Ivancic & Hesketh, 2000). Cependant, cette étude est également la seule à utiliser des rétroactions intradiégétiques issues d'une approche « par erreur » active. Malgré sa bonne efficacité pour réduire les erreurs des conducteurs sur les situations de test, cette approche possède 2 biais. Le premier est que dans une telle approche la bonne décision est l'absence d'action. Or, les conducteurs pourraient prendre la bonne décision pour d'autres raisons qu'une bonne maîtrise des compétences. Par exemple, en lien avec le fait d'être dans un environnement d'expérimentation, ou d'être peu à l'aise avec les commandes du simulateur. Le second a trait au cadre écologique véhiculé par cette rétroaction, qui constitue pourtant le principal intérêt des modalités intradiégétique (Salomoni et al., 2017). En effet, les erreurs actives sont rares dans l'accidentologie des novices. En effet, de nombreux travaux montrent que la majorité des erreurs des conducteurs en situation réelle vient d'une absence d'action dans une situation comprenant un danger, plutôt que d'une action erronée dans une situation ne présentant pas de danger a priori (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; Seacrist et al., 2018).

4.4 Conclusion

Les travaux présentés dans ce chapitre soulèvent plusieurs questions quant à l'efficacité des formations utilisant le simulateur pour l'apprentissage des compétences. Une première question concerne l'efficacité des formations utilisant le simulateur à des fins d'exposition à des situations critiques, en comparaison des formations ne l'utilisant qu'à des fins d'évaluation. En effet, les nombreuses limites méthodologiques des études utilisant l'approche « par simulateur » empêchent de conclure quant à leur efficacité.

Nous avons aussi abordé cette question du contenu des formations par le biais de la notion de rétroaction, centrale pour l'apprentissage. Ainsi, dans les formations « par simulateur », les rétroactions intradiégétiques issues des erreurs des conducteurs sont systématiquement associées à des rétroactions différées extradiégétiques. Toutefois, ces rétroactions extradiégétiques sont hétérogènes. Certaines proposent des explications en « vue du dessus » (Vlakveld et al., 2011), d'autres un jeu des performances (Divekar et al., 2013; Wang et al., 2010) et d'autres encore des scores de performance (R. W. Allen et al., 2010, 2011). Cette forte hétérogénéité rend difficile toute comparaison de résultats inter-études qui empêche, de fait, de se prononcer quant à leur efficacité relative respective.

Cependant, le fait que l'approche « par erreur » fasse l'objet d'un systématisme dans les formations « par simulateur » interroge. En effet, les formations « par simulateur » aux compétences d'anticipation des dangers montrent une amélioration des compétences en simulateur, malgré la diversité des modalités supplémentaires associées. Par conséquent, une partie de l'apprentissage des compétences pourrait passer par la rencontre entre l'apprenant et des situations difficiles propices à l'occurrence d'erreur. Dans ce cadre, les erreurs seraient alors des événements saillants, pouvant motiver l'apprentissage de la tâche (Kulhavy, 1977).

L'approche « par simulateur, par erreur » pourrait être associée à ce qu'il se passe durant les premiers mois de conduite des novices. Lorsqu'ils rencontrent une situation critique pour l'apprentissage, les conséquences de la bonne ou de la mauvaise gestion de cette dernière pourraient en effet favoriser l'occurrence de l'apprentissage expérientiel (Brehmer, 1994; Burkhardt, Corneloup, et al., 2016; A. Y. Kolb & Kolb, 2012; Williams, 2013). Toutefois,

même dans ce cadre, il existe une incertitude quant à l'utilisation que fera l'apprenant de cette rétroaction. En effet, Burkhardt, Cabon et al., (2016, p.22) notent que des travaux (ex. Anderson, Kulhavy, & Andre, 1971) « ont mis en évidence le fait que, souvent, les sujets n'utilisent pas les rétroactions de la façon dont les expérimentateurs l'attendent ». Par conséquent, l'effet réel de l'erreur sur l'apprentissage des compétences de l'apprenant ne peut être garanti. Cette particularité explique peut-être pourquoi la majorité des protocoles « par simulateur » les associent à une rétroaction différée élaborée.

Par conséquent, davantage de travaux semblent nécessaires pour évaluer l'efficacité des approches « par simulateur » et des rétroactions associées pour l'apprentissage des compétences perceptives et cognitives de conduite. En premier lieu, il s'agirait d'améliorer les connaissances concernant l'utilisation des erreurs comme moyen pédagogique. Notamment, aucun travail à notre connaissance n'étudie l'efficacité d'une approche « par erreur » passive isolée sur l'apprentissage des compétences perceptives et cognitives. En second lieu, un point étonnant est qu'aucune des formations « par simulateur » recensées n'utilise les possibilités de la réalité virtuelle pour fournir de façon immédiate une rétroaction élaborée à l'apprenant. Or, une telle rétroaction satisferait tous les critères d'efficacité pour l'apprentissage (Shute, 2008; Van der Kleij et al., 2015). Elle pourrait donc s'avérer efficace pour l'apprentissage des compétences de conduite de haut niveau perceptives et cognitives.

5 Évaluer les compétences de haut niveau perceptives et cognitives : mesures « situées » en réalité virtuelle

Un apprentissage en simulateur n'a d'intérêt que si les acquis obtenus sont transférables aux situations réelles (Rolfe & Caro, 1982), c'est-à-dire à un ensemble de situations critiques de conduite plus large et varié que la stricte réplique des situations rencontrées au cours de l'exposition. L'efficacité d'un programme d'entraînement peut ainsi être évaluée sur la base d'un tel transfert des compétences acquises en situation d'entraînement à des situations plus ou moins similaires. Outre la question des méthodologies expérimentales pour la mesure de cet effet de transfert, deux autres questions complémentaires paraissent importantes. La première concerne la « distance » entre les situations auxquelles l'apprenant est exposé lors de l'étape d'acquisition et les situations utilisées pour l'évaluation. La seconde question concerne l'identification de situations et d'indicateurs efficaces pour évaluer ces compétences. Nous entendons par indicateurs les marqueurs comportementaux, qui indiquent la présence ou l'absence d'une compétence, dans une situation donnée (Flin et al., 2008; Fuller, 2005). Les indicateurs sont basés sur des observables. Ces dernières désignent « toutes données – concernant l'individu et la situation – qui peut être obtenue à l'aide d'un outil de mesure (ex. capteur, questionnaire, etc). Les observables se caractérisent par conséquent comme des données ayant trait au comportement ou à la situation d'évaluation, qu'il est possible pour un observateur de voir et enregistrer sur un support » pour y effectuer des traitements et analyses subséquentes (Burkhardt, Cabon, et al., 2016, p.33). L'identification de tels indicateurs peut s'appuyer sur nombre d'études étudiant les compétences de conduite au moyen d'un paradigme expérimental opposant conducteurs expérimentés et novices (voir par exemple Crundall, 2016; Crundall et al., 2012; Crundall & Underwood, 1998; M. Green, 2000).

5.1 Évaluer l'efficacité de l'entraînement par la mesure de l'effet de transfert

5.1.1 Protocoles d'évaluation du transfert

L'évaluation du transfert constitue le moyen le plus efficace pour évaluer l'efficacité de l'apprentissage en simulateur (Rolfe & Caro, 1982). Un transfert à lieu lorsque l'apprentissage d'une stratégie dans un certain contexte ou une certaine configuration matérielle impacte la performance dans un autre contexte ou une autre configuration matérielle (Perkins & Salomon, 1992; N. Seel, 2012).

Rolfe & Caro (1982) identifient six principaux protocoles expérimentaux mobilisables dans le cadre de l'évaluation de l'apprentissage sur simulateur.

Le protocole d'évaluation du **transfert d'entraînement avec groupe contrôle** consiste à comparer deux groupes : un groupe entraîné et un groupe contrôle. Le groupe entraîné reçoit l'entraînement en simulateur. Le groupe contrôle reçoit soit un entraînement placebo, soit tout son entraînement en situation réelle, de façon à s'assurer que les deux groupes comparés ne diffèrent que par la modalité de formation testée. Les performances des deux groupes sont alors comparées sur une tâche exécutée en situation réelle. Par ailleurs, la constitution des deux groupes doit être strictement équivalente (âge, expérience) pour s'assurer que seul l'effet de l'entraînement soit mesuré. Rolfe et Caro (1982) indiquent que ce plan est certainement le plus approprié pour mesurer l'effet de transfert, puisque l'évaluation porte sur la capacité du simulateur à faire apprendre une tâche encore jamais réalisée dans la réalité.

Le protocole **d'évaluation de l'amélioration des performances en simulateur** consiste à évaluer les effets de l'entraînement par une évaluation ayant lieu uniquement en simulateur. Les auteurs indiquent ainsi que si des améliorations ne sont pas constatées en simulateur, il y'a peu de chances qu'elles soient constatées en situation opérationnelle, hors du

simulateur (Rolfe & Caro, 1982). Ce protocole peut être combiné avec un groupe contrôle comme dans le cas du Transfert d'entraînement avec groupe contrôle. La seule différence est alors que la performance est évaluée sur simulateur et non en situation réelle.

Le protocole d'évaluation du **transfert sur la base de mesures de performances déjà recueillies** intervient lorsqu'une nouvelle formation vient remplacer une formation préexistante. Dans ce cadre, les performances des conducteurs ayant reçu la nouvelle formation sont comparées aux performances des conducteurs ayant reçu l'ancienne formation. Ces données préexistantes font alors office de données contrôles pour déterminer l'efficacité du nouveau simulateur. Ce type d'approche est utile quand la constitution d'un groupe contrôle n'est pas possible. Le protocole d'évaluation du **transfert avec autocontrôle** consiste à comparer les performances des conducteurs avant l'entraînement, à leurs performances après l'entraînement. Dans ce cadre, le groupe « contrôle » et le groupe test est constitué des mêmes conducteurs. Cette approche est utile lorsque la formation utilisant le simulateur n'est qu'une étape intermédiaire de la formation, mais que les expérimentateurs veulent en évaluer l'efficacité spécifique. Le protocole d'évaluation du **transfert non-contrôlé** est utile en l'absence de données de références et de la possibilité de mettre en place un groupe contrôle. Ce protocole consiste à évaluer la capacité du simulateur à faire apprendre une tâche encore jamais réalisée dans la réalité, sans avoir eu l'opportunité de l'apprendre autrement. Le protocole d'évaluation du **transfert d'entraînement rétrograde** consiste à observer si des opérateurs maîtrisant déjà les objectifs de formation vont réussir à appliquer cette maîtrise à une tâche correspondante, effectuée en simulateur. Si la tâche est réussie lors de la situation d'évaluation en simulateur, sans avoir utilisé ce dernier précédemment, alors il y'a transfert rétrograde.

Les études existantes s'appuient pour l'essentiel sur un protocole d'évaluation de l'amélioration des performances en simulateur avec un groupe contrôle (voir par exemple W. Allen et al., 2011; Crundall et al., 2012; Ivancic & Hesketh, 2000; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Dans le cadre des études portant sur l'évaluation d'une formation des conducteurs à l'aide du simulateur, ce groupe contrôle est constitué de conducteurs novices n'ayant pas reçu l'entraînement. Dans le cadre des études qui ne portent que sur l'évaluation des compétences, sans faire intervenir la notion de formation, ce protocole est adapté par l'opposition entre conducteurs expérimentés et novices (voir par exemple Crundall, 2016; Crundall et al., 2012; Crundall & Underwood, 1998; M. Green, 2000). Il existe quelques études utilisant un protocole d'évaluation du transfert d'entraînement avec groupe contrôle et en situation réelle. Elles s'appuient alors sur des données issues du comportement routier réel (accidentologie, infractions commises. (R. W. Allen et al., 2010; Hirsch & Bellavance, 2017; Hoskovec & Stikar, 1971; Moreno-Roldán et al., 2018). Toutefois, de nombreux auteurs estiment que ce type de protocole est trop peu présent dans les travaux sur la formation aux compétences de conduite (Beanland et al., 2013; Moreno-Roldán et al., 2018). Une telle absence empêchant de conclure sur l'efficacité réelle des formations supplémentaires sur la sécurité et l'efficacité de la conduite. Enfin, quelques travaux, plutôt centrés sur les compétences techniques, s'appuient sur un protocole de type transfert avec autocontrôle (van Leeuwen et al., 2015), de transfert non contrôlé (Hoskovec & Stikar, 1971) ou de type transfert d'entraînement rétrograde (Fisher et al., 2002). Le protocole d'évaluation du transfert sur la base de mesures de performances déjà recueillies n'est pas retrouvé dans la littérature à notre connaissance.

5.1.2 Caractériser la distance du transfert

5.1.2.1 Traits de surface, traits de structure

La question de la « distance » du transfert entre situations d'entraînement et situation test est peu formellement abordée dans le champ de l'évaluation de l'efficacité de l'apprentissage de la conduite sur simulateur. Cette question a été plutôt mobilisée dans le cadre des travaux sur la résolution de problème par analogie (Gick & Holyoak, 1983; Holyoak & Koh, 1987; Mayer & Wittrock, 1996; Wertheimer, 1959).

La distance entre deux situations peut être de deux types non exclusifs : de surface et de structure (Holyoak & Koh, 1987). Les traits de structure désignent les caractéristiques de la situation qui sont déterminantes pour le but à atteindre. Une similarité de structure indique que deux situations présentent un but identique, qui peut être atteint par l'utilisation des mêmes stratégies d'action. Les traits de surface concernent les caractéristiques de la configuration de la situation, qui ne changent pas le but à atteindre.

En conduite, les traits de structure pourraient être assimilés aux traits de la situation qui caractérisent le type de danger ou de problème à résoudre ou à neutraliser. Par exemple, deux types de dangers sont retrouvés dans la littérature (voir 5.2 pour une description précise de ces situations). Dans les situations « couvertes », le danger est caché par un élément de l'environnement (ex. un camion cachant la partie droite d'un passage piéton. A l'arrivée du conducteur, un piéton surgit brusquement). Dans les situations « ouvertes », le danger est visible en amont, mais son comportement est susceptible de provoquer une situation dangereuse (ex. un enfant au bord de la route, qui commence à traverser à l'approche du conducteur). Les traits de surface désignent la configuration routière ou les comportements des autres usagers qui modifie l'apparence de la situation, sans y changer le problème ou le danger (ex. situations couvertes : camion devient un bus ; situations ouvertes : enfant devient un animal). Deux situations de même structure peuvent ainsi avoir des traits de surface différents.

5.1.2.2 Une caractérisation de la distance peu claire dans la littérature

Cependant, il est important de noter que ces propriétés sont des « notions intuitives, qui résistent à une codification précise. Elles sont utiles pour caractériser certains aspects du transfert, mais n'impliquent pas de mesure stricte de la notion de similarité » (Perkins & Salomon, 1992, p.4). Par conséquent, la notion est utilisée de manière variée dans l'évaluation des programmes d'entraînement en simulateur de conduite et manque souvent de précision.

Du point de vue des terminologies et définitions utilisées, un premier groupe d'auteurs évaluent le transfert entre situations « proches » et « lointaines » de la situation d'entraînement (Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006; Vlakoveld et al., 2011). Les situations proches sont définies comme étant différentes de la situation d'entraînement, mais contenant des types de danger « conceptuellement » identiques. Au contraire, les situations « lointaines » désignent des situations dont le type de danger « diffère conceptuellement » de celui de la situation d'entraînement. Toutefois, ces auteurs ne clarifient pas ce qu'indique en termes de similarité de structure ou de surface une différence « conceptuelle » entre deux types de dangers. D'autres auteurs évaluent le transfert entre situations « équivalentes » et « analogues » à la situation d'entraînement (Wang et al., 2010). Cette fois, ils précisent les relations de structure et de surface entretenues par les situations. Une situation équivalente est définie comme possédant les « mêmes éléments à risque (surface) et stratégies (structure) nécessaires pour détecter le danger » que la situation d'entraînement. Une situation analogue ne comprend pas de traits de surface commun mais la même structure car elle nécessite « les mêmes stratégies » pour y détecter le danger. La question de la différence inter-situation « de structure » a été également été abordée sous le terme de situation « adaptée » chez certains auteurs (Ivancic & Hesketh,

2000). Il s'agit alors pour les apprenants d'utiliser leur expérience d'un problème déjà rencontré pour générer une stratégie nouvelle, dans le cadre d'une situation de conduite potentiellement dangereuse, nécessitant une approche différente pour être résolu (Ivancic & Hesketh, 2000; E. M. Smith, Ford, & Kozlowski, 1997). Enfin, certains auteurs ne définissent pas précisément la distance du transfert qu'entretiennent les situations test avec la situation d'entraînement (Agrawal et al., 2017; R. W. Allen et al., 2011).

Toutefois, du point de vue des situations utilisées, les définitions données par les auteurs ne sont pas toujours respectées dans l'opérationnalisation des situations. Par exemple, une situation « proche » dans l'étude de Vlakoveld et al. (2011) est une situation couverte dont le danger est caché par une haie. Une situation « lointaine » correspondante est alors une situation couverte dont le danger est caché par un camion. Or, ces situations, ne semblent pas différer « conceptuellement » quant au type de danger utilisé. Dans Wang et al. (2010), un couple de situations (entraînement et test) comprend un véhicule (une voiture dans l'entraînement et un taxi dans la situation test) qui pile brusquement devant le conducteur. Ces situations sont qualifiées d'équivalentes par les auteurs car elles possèdent les mêmes éléments à risque et nécessitent les mêmes stratégies pour être résolues. Or, les auteurs décrivent un autre couple de situations, « analogiques » cette fois, qui apparaît pourtant posséder les mêmes propriétés de distance que les situations équivalentes précédemment décrites. En effet, il s'agit de deux situations dans lesquelles un piéton surgit de l'arrière d'un véhicule. Or, il s'agit du même type de véhicule dans les deux cas : un bus lors de l'entraînement, un camion lors du test. Les éléments à risque y sont donc quasiment identiques. Enfin, plusieurs études proposent des situations de test qui sont en tous points similaires aux situations d'entraînement, c'est à dire dont l'intégralité des traits de surface et de structure sont communs (R. W. Allen et al., 2011; Wang et al., 2010).

5.1.3 Typologie des situations pour évaluer le transfert

Au regard de l'hétérogénéité des terminologies et opérationnalisations constatées dans la littérature, nous proposons un cadre composé de 4 types de situations pour évaluer le transfert : similaires, proches, lointaines et adaptées (voir tableau 8). Cette typologie se base sur la proximité entre les situations test et la situation d'entraînement, en termes de traits de surfaces et de traits de structure partagés.

Tableau 8, types de situations de transfert utilisés pour évaluer l'efficacité de l'apprentissage en simulateur de conduite

Terminologies des situations tests utilisées pour évaluer l'apprentissage	Similarités avec la situation d'entraînement		Travaux correspondants
	Surface	Structure	
Similaires	Forte	Forte	(R. W. Allen et al., 2011; Wang et al., 2010)
Proches	Moyenne	Forte	(Agrawal et al., 2017; Crundall et al., 2010; Fisher et al., 2002; Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006; Vlakoveld et al., 2011; Wang et al., 2010)
Lointaines	Faible	Forte	(Agrawal et al., 2017; Crundall et al., 2010; Ivancic & Hesketh, 2000; Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006; Vlakoveld et al., 2011; Wang et al., 2010)
Adaptées	Forte	Faible	(Ivancic & Hesketh, 2000)

5.1.3.1 Situations similaires, proches, lointaines et adaptées

Les situations similaires possèdent des traits de surfaces strictement identiques à ceux présentés par la situation d'entraînement (R. W. Allen et al., 2011; Wang et al., 2010). Tous les traits de surface et de structure présents lors de la situation d'apprentissage sont disponibles. Par exemple, Wang et al., (2010), proposent une situation d'entraînement dans laquelle une voiture précédant le conducteur tourne à droite à une intersection, mais pile brutalement pour éviter un piéton en train de traverser. Dans ce cadre, la situation similaire consistera en une réplique exacte de cette situation, avec pour tout changement la voiture de devant qui devient un taxi (Wang et al., 2010, p.18). Les situations peuvent également être similaires si seule l'apparence des traits de surfaces change, mais qu'ils sont tous conservés (ex. situation d'entraînement en zone rurale, situation de test en ville, voir figure 18 ; W. Allen et al., 2017).

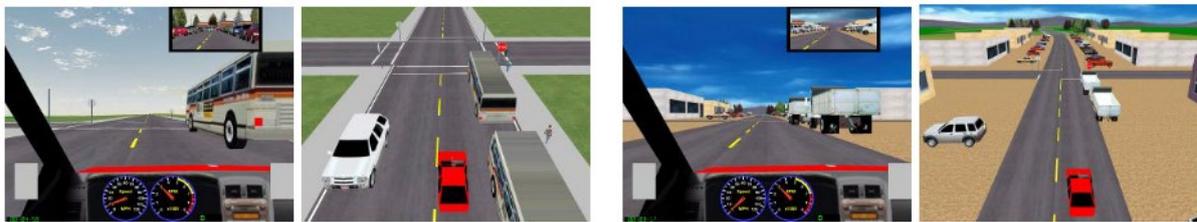


Figure 18, exemple de situations similaires, tirées de Allen et al. (2011). A gauche, la situation d'entraînement en milieu rural, à droite, la situation de test en milieu urbain.

Des situations proches possèdent également un grand nombre de traits de surface communs avec la situation d'entraînement (voir figure 19). Cependant, elles en possèdent moins que la situation similaire. Les traits de structure sont conservés, mais certains traits de surface disparaissent. Ainsi, certains auteurs manipulent la proximité en modulant la présence ou l'absence des éléments du décor (ex. configuration routière : nombre de voies, courbe de la route ; objets du décor : densité des arbres ; et objets non pertinents), ou le comportement des autres usagers (ex. situation d'entraînement, arrive de la gauche ; situation test : arrive de la droite) tout en gardant l'ensemble des traits critiques présents dans la situation d'entraînement (Ivancic & Hesketh, 2000). Par exemple, dans l'étude de Wang et al., (2010), une situation d'entraînement correspond à une intersection à négocier, une moto arrivant à vive allure par la droite. La situation test correspondante sera la même situation, la moto arrivant cette fois par la gauche.

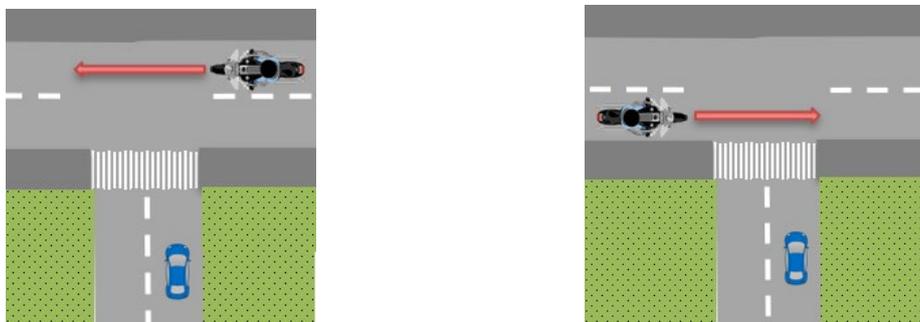


Figure 19, exemple de situations d'entraînement (à gauche) et de test proche (à droite), tirés de Wang et al., (2010)

Les situations lointaines possèdent les mêmes traits de structure que la situation d'entraînement mais en diffèrent sur l'ensemble des traits de surface. Les situations lointaines présentent un problème similaire à la situation d'entraînement, qui peut être résolu en utilisant les mêmes stratégies d'action. Cependant, tous les traits de surface changent. De plus, si le danger y est fondamentalement de même nature (ex. un véhicule coupant la voie du conducteur), il peut s'y manifester différemment. Par exemple, dans l'étude de Vlakoveld et al., (2011), un scénario d'entraînement est un camion cachant la vue sur la partie droite d'un passage piéton – un piéton sort de l'arrière du camion à l'approche du conducteur. Un scénario lointain est alors un passage piéton, dont les côtés sont cachés par une haie, à l'abord d'une intersection. A l'approche du conducteur, un piéton surgit de la gauche de la haie (voir Figure 20).

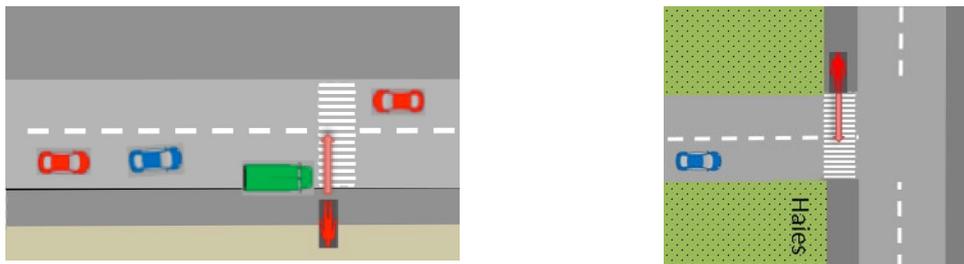


Figure 20, exemple de situations d'entraînement (à gauche) et de test lointaine (à droite), tirés de Vlakoveld et al., (2011)

Les situations adaptées peuvent posséder des traits de surface communs avec la situation d'entraînement. Toutefois, le danger y est différent. Par exemple, Ivancic & Hesketh (2000) proposent une situation d'entraînement dans laquelle un conducteur est bloqué sur la voie de droite par une barrière en béton (voir figure 21). Des véhicules arrivent en sens inverse sur la voie de gauche et empêchent le conducteur de passer. La situation « adaptée » correspondante est en tous points semblable en surface. Cependant, la difficulté provient de véhicules arrivant sur la voie de gauche mais cette fois dans le même sens que le conducteur. Celui-ci doit donc adapter la stratégie de la situation d'entraînement (laisser passer les véhicules arrivants d'en face) à la seconde situation (laisser passer les véhicules arrivant de l'arrière).

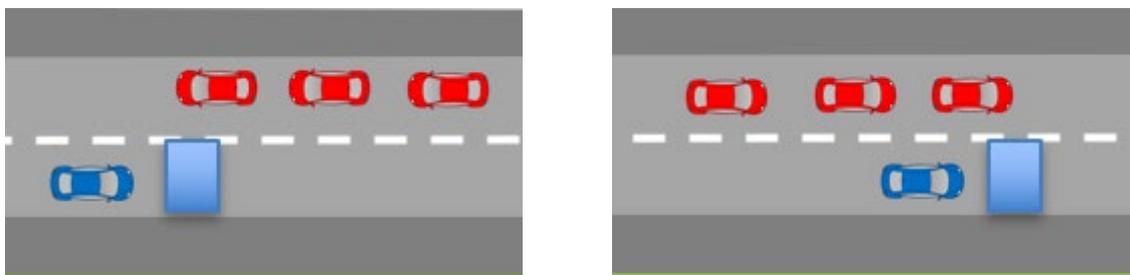


Figure 21, exemple de situations d'entraînement (à gauche) et de test adaptée (à droite), tirés de Ivancic et Hesketh (2000)

5.1.3.2 Efficacité du transfert en fonction de la distance inter-situation

A l'aune de cette typologie, les résultats observés dans la littérature montrent un effet de transfert important entre la situation d'entraînement et les situations similaires et proches (R. W. Allen et al., 2011; Vlakveld et al., 2011). Cet effet est moins important dans le cas des scénarios lointains (Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Dans le cas des scénarios adaptés, les résultats ne sont pas significatifs (Ivancic & Hesketh, 2000).

Dans l'étude de Allen et al., (2011), les conducteurs ne sont confrontés qu'à des scénarios similaires. Dans ce cadre, les conducteurs entraînés évitent mieux les collisions, font moins d'excès de vitesse, commettent moins de violations et font moins d'erreurs de trajectoire que des conducteurs non-entraînés lors des situations tests. Dans l'étude de Vlakveld et al. (2011), 83% des conducteurs ayant reçu l'entraînement démontrent des comportements corrects de détection du danger dans les scénarios proches, contre seulement 56% des conducteurs non entraînés.

Dans l'étude de Vlakveld et al., (2011), 70% des conducteurs ayant reçu l'entraînement démontrent des comportements corrects de détection du danger dans les scénarios lointains (contre 53% des non entraînés). Ce chiffre est inférieur aux 83% constatés dans le cadre des situations de tests proches. Ces résultats sont similaires à ceux de l'étude de Wang et al., (2010). Les situations adaptées sont encore moins bien réussies que les situations lointaines. Ivancic & Hesketh (2000), constatent que les conducteurs entraînés font moins d'erreur que les conducteurs non-entraînés dans le cadre des situations lointaines.

Aucun transfert n'est retrouvé dans le cadre des situations adaptées. Le groupe entraîné ne fait pas significativement moins d'erreur que le groupe non-entraîné dans le cadre des situations adaptées. Cela tendrait à confirmer que le transfert ne se fait qu'entre situations présentant une structure commune (Holyoak & Koh, 1987).

5.2 Un focus sur les situations contenant un danger

La majorité des travaux comportant une évaluation des compétences de conduite perceptives et cognitives observent le comportement des conducteurs confrontés à des situations contenant un danger (Beanland et al., 2013; Goode et al., 2013; McDonald et al., 2015; Salmon et al., 2012). Un danger désigne dans ce cadre tout objet ou évènement dans l'environnement routier, qui augmente significativement le risque de collision entre un élément de l'environnement et le conducteur, si ce dernier fait une erreur ou si il ne déclenche pas de contre-mesure pour le neutraliser (ex. Crundall, 2016; Hoyos, 1988).

L'utilisation des situations de danger pour l'évaluation des compétences est expliquée par deux raisons principales. La première est liée aux caractéristiques de l'accidentologie des conducteurs novices. Notamment, le fait que cette dernière diminue durant les premiers mois de conduite indique que les conducteurs sont de plus en plus aptes à maîtriser les situations contenant un danger potentiel. La seconde raison est théorique. Elle est liée à la caractéristique « située » des compétences et aux caractéristiques de leur apprentissage. En effet, une compétence est indissociable de la situation dans laquelle elle s'exerce (Falzon et al., 2014; Leplat & Montmollin (de), 2001; Wittorski, 1998). Or, Falzon et al., (2014, p.224) précisent que « la compétence se construit non par une répétition des gestes et des actions, mais par la connaissance du résultat de l'action face aux obstacles pour atteindre le but. ». En conduite, cette notion d'obstacle pourrait référer à la présence d'un risque ou d'une difficulté (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016). Par conséquent, un sujet est dit « compétent », lorsqu'il réussit à maintenir sa sécurité et à réaliser son but, dans une situation présentant une difficulté ou un risque. Les situations contenant un danger potentiel, qui peuvent combiner les deux caractéristiques, apparaissent donc indiquées pour les mesurer.

Trois catégories de situations contenant des dangers sont utilisées pour évaluer les compétences perceptives et cognitives : les situations ouvertes, les situations couvertes et les situations d'intrusion (voir tableau 9). Ces situations diffèrent du point de vue de la visibilité du danger et des compétences à solliciter pour l'éviter.

Tableau 9, types de situations utilisées pour évaluer les compétences de conduite perceptives et cognitives des conducteurs

Situations	Définition	Compétences perceptives et cognitives impliquées	Etudes mobilisant ce type de situation
<u>Couvertes</u>	Situations dans lesquelles un élément de l'environnement cache le danger potentiel, qui apparaît de façon abrupte, à l'approche du conducteur <i>Ex. Un camion cache la vue sur la partie droite d'un passage piéton. A l'approche du conducteur, un piéton surgit de l'arrière du camion pour traverser la route</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Évaluation de la situation</u> : <ul style="list-style-type: none"> ○ Détection et exploration de l'élément cachant le danger ○ Détection rapide du danger à son apparition • <u>Prise de décision</u> : <ul style="list-style-type: none"> ○ Ralentissement anticipatoire ○ Freinage rapide à l'apparition du danger 	(Crundall, 2016; Crundall et al., 2012; Fisher, Pradhan, Pollatsek, & Knodler, 2007; Garay-Vega, Fisher, & Pollatsek, 2007; S. E. Lee et al., 2008; Malone & Brünken, 2015; Pradhan et al., 2005; Pradhan, Simons-Morton, Lee, & Klauer, 2011; Vlakveld et al., 2011; Yeung & Wong, 2015)
<u>Ouvertes</u>	Situations dans lesquelles le danger potentiel est visible en amont. C'est le comportement de ce danger potentiel qui détermine l'occurrence du danger. <i>Ex. un autre véhicule arrivant sur une route non prioritaire adjacente ne ralentit pas à l'approche d'un cédez le passage et finit par refuser la priorité au conducteur</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Évaluation de la situation</u> : <ul style="list-style-type: none"> ○ Détection de l'élément potentiellement dangereux ○ Surveillance de l'élément dangereux • <u>Prise de décision</u> : <ul style="list-style-type: none"> ○ Ralentissement anticipatoire ○ Freinage rapide lorsque l'élément devient un danger 	(Crundall, 2016; Crundall et al., 2012; Gugerty, 1997; Malone & Brünken, 2015; Sagberg & Bjørnskau, 2006; G. Underwood, Ngai, & Underwood, 2013; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010; Yeung & Wong, 2015)
<u>Intrusion</u> (situations contrôlées)	Situations dans lesquelles le danger apparaît de façon brutale, sans pouvoir être temporellement anticipé par le conducteur	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Évaluation de la situation</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Capture attentionnelle • <u>Compétence technique</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Freinage 	(M. Green, 2000; Hankey, 1996; Lerner, 1993; G. Underwood et al., 2013; Yeung & Wong, 2015)

5.2.1 Situations couvertes

La structure des situations couvertes est la suivante : un élément de l'environnement cache le danger potentiel, qui apparaît de façon brutale à l'approche du conducteur (Crundall et al., 2012). Deux types de situations couvertes se distinguent sur la base d'une variation de leurs traits de surface : les situations où le danger est caché par un objet mobile ou potentiellement mobile et les situations où le danger est caché par un objet statique (voir figure 22 et 23).

Les situations dans lesquelles le danger est caché par un objet mobile ou potentiellement mobile sont souvent représentées par la présence d'un camion ou d'un véhicule de grande taille, qui cache par exemple la vue sur un passage piéton (ex. Crundall et al., 2012; Garay-Vega et al., 2007; S. E. Lee et al., 2008; Taylor et al., 2011).

Les situations où le danger est caché par un objet du décor statique sont moins courantes. Elles peuvent être représentées par la présence d'une haie ou d'un élément du décor, qui cache la vue sur la partie droite d'un trottoir, menant à un passage piéton (ex. Fisher et al., 2007; M. Green, 2000; Pradhan et al., 2005).

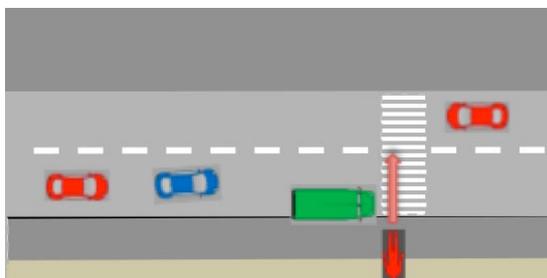


Figure 22, exemple de scénario couvert de type « mobile ou potentiellement mobile ». En bleu, la voiture du conducteur dont les compétences sont évaluées

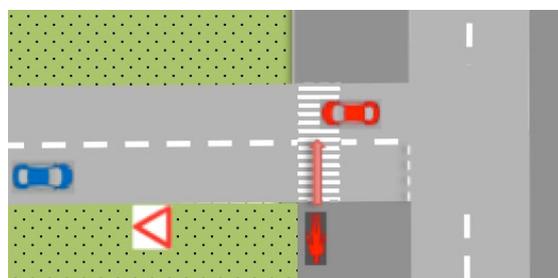


Figure 23, exemple de scénario couvert de type statique. En bleu, la voiture du conducteur dont les compétences sont évaluées.

Ces deux situations ne diffèrent pas sur les compétences impliquées. Dans les deux cas, les conducteurs doivent évaluer la situation et y prendre des décisions de façon anticipatoire (Crundall, 2016; Crundall et al., 2012). Du point de vue de l'évaluation de la situation, ils doivent commencer par repérer les éléments dans l'environnement susceptibles de cacher un danger. Sur cette base ils doivent moduler leur exploration de ces éléments pour favoriser la détection rapide d'un danger éventuel (ex. regard sur le bord avant gauche du camion pour détecter rapidement un danger caché derrière ; Fuller, 2005 ; Pradhan et al., 2005). Du point de vue de la prise de décision, ils doivent prendre la décision anticipatoire de ralentir de façon importante avant d'arriver au lieu du danger potentiel (Crundall et al., 2012), ainsi que se préparer à une manœuvre de freinage opérationnelle, si le danger advient effectivement (M. Green, 2000).

A notre connaissance, l'effet de la distance inter-situations couvertes n'a pas été étudiée. Toutefois, une différence réside potentiellement dans l'aisance à repérer les éléments susceptibles de cacher le danger. En effet, dans le cas de la situation camion, un véhicule est posté à un endroit de la chaussée qui est interdit par le code de la route. Par conséquent, cette transgression pourrait attirer l'attention des conducteurs. De plus, la majorité des situations accidentelles et presque accidentelles rencontrées par les conducteurs impliquent un autre véhicule (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; Seacrist et al., 2018). Par conséquent, les conducteurs pourraient être particulièrement attentifs à la présence d'un tel élément dans l'environnement. Au contraire, les situations de type « haie » pourraient être rares, voire quasi inconnues. En effet, le code de la route français recommande une co-visibilité piéton-véhicule à partir de 30m avant n'importe quel passage piéton (Certu, 2010).

5.2.2 Situations ouvertes

La structure des situations ouvertes est la suivante : le danger est visible durant un laps de temps important avant d'être réellement dangereux. C'est l'évolution de son comportement qui détermine sa dangerosité (Sagberg & Bjørnskau, 2006). Ces situations sont moins utilisées que les situations couvertes pour l'évaluation des compétences. Deux types de situations ouvertes se distinguent, sur la base d'une variation de leurs traits de surface : les situations où le danger est visible mais statique jusqu'à l'arrivée du conducteur ; et les situations où le danger est visible mais mouvant durant toute la situation (voir figures 24 et 25).

Les situations dans lesquelles le danger ouvert est visible mais statique sont souvent représentées par la présence d'un individu positionné sur le bas-côté, qui traverse inopinément à l'approche du conducteur. Crundall et al. (2012), donnent l'exemple d'un enfant posté entre des voitures garées, qui traverse la route inopinément à l'approche du conducteur.

Les situations où le danger ouvert est visible et mouvant sont souvent représentées par la présence d'un autre véhicule (voiture, vélo), arrivant en direction du conducteur, et finissant par lui couper la route en dépit des règles du code de la route (ex. refus de priorité). Yeung et al., (2015), donnent l'exemple d'une voiture arrivant sur une voie adjacente et non prioritaire sans faire mine de ralentir, et finissant par couper la route du conducteur.

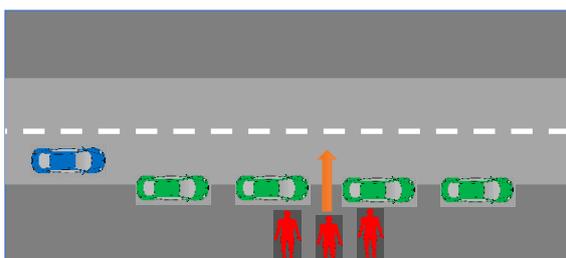


Figure 24, exemple de scénario ouvert de type « piéton ». En bleu, la voiture du conducteur dont les compétences sont évaluées

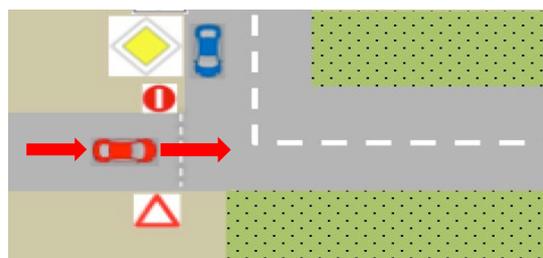


Figure 25, exemple de scénario ouvert de type « véhicule ». En bleu, la voiture du conducteur dont les compétences sont évaluées

Pour maîtriser les situations ouvertes, les conducteurs utilisent également leurs compétences d'évaluation et de prise de décision anticipatoire (Crundall, 2016; Crundall et al., 2012; Pradhan et al., 2005; Yeung & Wong, 2015). Toutefois, elles ne s'y déploient pas de la même manière que dans les situations couvertes. En effet, dans ce type de situation, les conducteurs n'ont pas de difficulté à repérer l'autre véhicule ou individu, qui est constamment visible. Ils doivent cependant surveiller de manière active et continue son comportement. En effet, dans ces situations, leur tâche consiste à anticiper les intentions potentiellement de l'individu, au regard du danger potentiel qu'elles peuvent impliquer (Mundutéguy & Darses, 2007; Mundutéguy & Ragot-Court, 2011; Sagberg & Bjørnskau, 2006). Au niveau des compétences de prise de décision, à l'instar des situations couvertes ils doivent également se préparer à un tel comportement risqué, en ralentissant de manière anticipatoire, ou en se préparant à un freinage brutal le cas échéant (Crundall et al., 2012; Yeung & Wong, 2015).

Toutefois, la mobilisation des compétences est légèrement différente entre les deux situations. Dans les situations statiques, l'évaluation et la prise de décision anticipatoire servent à minimiser l'impact d'un danger potentiel qui est avant tout « temporellement incertain ». Les intentions de l'individu, quelle qu'elles soient, vont être anticipées au regard de la sévérité potentielle de la situation. Dans les situations ouvertes où le danger est mouvant, il s'agit pour le conducteur d'évaluer le danger par l'analyse de la dynamique de la situation (vitesse et trajectoire des protagonistes désignant un moment et un point d'impact potentiel ; Green, 2000).

Cette fois, il s'agit plutôt de comprendre les intentions de l'individu, pour réduire l'ambiguïté face à un comportement qui paraît peu cohérent avec les règles de sécurité (Mundutéguy & Darses, 2007; Mundutéguy & Ragot-Court, 2011).

5.2.3 Situations d'intrusion

Les situations d'intrusion diffèrent des situations couvertes et ouvertes au sens où leur structure implique que le danger n'est pas raisonnablement prévisible. Green (2000, p.208) indique que « malgré la rareté de tels événements lors de la conduite, ces derniers ont une très faible probabilité que les conducteurs qui les rencontrent ne possèdent pas suffisamment d'expériences, pour avoir développé les réponses automatiques pour y répondre. » Par conséquent, de telles situations auront vocation à servir de contrôle pour l'évaluation des compétences perceptives et cognitives d'anticipation des dangers. En effet, en n'impliquant pas ces dernières, elles fournissent une ligne de base concernant les comportements d'évitement des dangers, dénués de toutes anticipation

Un enjeu pour la mise en place de ces situations est de les rendre à la fois suffisamment écologiques tout en étant capables de susciter un effet d'intrusion chez le conducteur. Il s'agit notamment d'éviter d'y inclure assez d'indices de danger potentiel pour qu'elles puissent être anticipées par les conducteurs, de manière à créer une réelle surprise. Plusieurs auteurs proposent ainsi des situations d'intrusion dans lesquelles un véhicule coupe la route du conducteur lors de son arrivée à une intersection (Hankey, 1996; Yeung & Wong, 2015). D'autres proposent un policier sur le bord de la route, qui lève brusquement un panneau de stop pour arrêter le conducteur (Summala & Koivisto, 1990). Ces situations sont critiquables. En effet, une intersection est susceptible de voir arriver plusieurs véhicules, de même qu'un policier sur le bord de la route est susceptible d'arrêter un véhicule qui passe à côté de lui.

Certains auteurs proposent au contraire des situations fortement improbables. Par exemple des situations dans lesquelles des objets (barils) ou des individus coupent la route du conducteur, sans que l'environnement ait pu le suggérer (en provenance d'un endroit invisible au conducteur, voir figure 26 ; Lerner, 1993; Yeung & Wong, 2015). Cette dernière solution semble ainsi la plus pertinente. En effet, bien qu'il soit possible qu'un individu surgisse de nulle part sur la chaussée, un tel scénario apparaît hautement improbable. C'est alors cette improbabilité qu'il semble nécessaire de manipuler pour la création de situations d'intrusion efficaces.

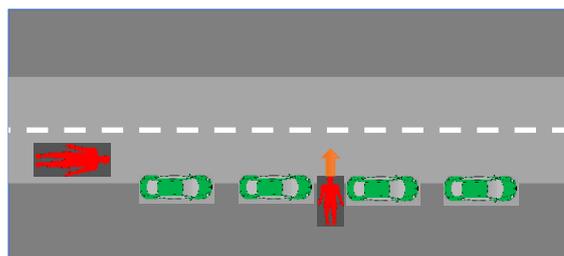


Figure 26, exemple de situation d'intrusion

5.3 Indicateurs pour l'évaluation des compétences perceptives et cognitives en conduite simulée

Trois approches peuvent être distinguées pour évaluer les compétences de conduite de haut niveau dans les situations contenant un danger précédemment décrit. Ces approches se fondent sur le recueil de données verbales, oculométriques ou comportementales (voir par exemple Crundall, 2016; Crundall et al., 2012; P. Green, 2013). Ces approches utilisent majoritairement des paradigmes comparatifs « experts/novices » pour évaluer les compétences (voir par exemple Crundall, Chapman, Phelps, & Underwood, 2003; Crundall et al., 2012; Kinnear, Kelly, Stradling, & Thomson, 2013; Underwood, 2007).

Dans cette partie, nous procéderons pour chaque type de méthode en détaillant d'abord ses caractéristiques, avantages et inconvénients pour l'évaluation des compétences perceptives et cognitives. Nous décrivons également comment chacune de ces méthodes peut s'inscrire dans les situations d'évaluation que nous avons décrites précédemment. Enfin, nous indiquons, pour chacune de ces méthodes, et dans chaque type de situation, les différences entre conducteurs expérimentés et conducteurs novices constatées dans la littérature.

5.3.1 Approches verbales

5.3.1.1 Mesurer les compétences après la situation de conduite

La SAGAT (Situation Awareness Global Assessment Technique) est l'outil d'évaluation des compétences d'évaluation de la situation le plus répandu. Utilisé dans un cadre de simulation en réalité virtuelle, il consiste à geler l'image d'une scène, et à questionner l'opérateur sur ses connaissances vis-à-vis de la scène juste vécue.

Les compétences de perception peuvent être évaluées en demandant la localisation d'un élément précédemment apparu dans la scène. Les compétences de compréhension sont évaluées en interrogeant le conducteur sur les comportements à adopter pour améliorer sa conduite dans une telle situation juste vécue. Enfin, les compétences de projection sont évaluées en demandant à l'opérateur d'émettre une projection sur le déroulement futur de la situation (Ma & Kaber, 2007; Ruiqi Ma & Kaber, 2005). Crundall (2016) utilise cette méthode pour montrer que les conducteurs expérimentés prédisent mieux que les conducteurs novices l'occurrence prochaine d'un danger dans les situations dangereuses couvertes (Crundall, 2016).

La SAGAT présente cependant un certain nombre de faiblesses. En premier lieu, elle est fortement intrusive au regard de la tâche principale de conduite qu'elle interrompt (Salmon et al., 2012). En second lieu, elle n'est pas écologique et ne peut pas être appliquée à des situations réelles de conduite ou d'apprentissage de la conduite.

5.3.1.2 Mesurer les compétences pendant la situation de conduite

Pour remédier à ces défauts, la méthode SPAM (Situation Present Assessment technique, Durso & Dattel, 2004), propose à l'opérateur de répondre en direct, pendant la tâche, aux mêmes types de questions posées par la SAGAT. Dans la SPAM, un indice visuel ou sonore indique à l'opérateur qu'une question est disponible.

La latence et la précision des réponses du conducteur sont enregistrées. Plus les réponses sont rapides et précises, meilleures sont les compétences de conscience de la situation. La SPAM est ainsi moins intrusive, et utilisable dans une variété de contextes plus importante puisque la situation n'a pas à être gelée pour permettre la réponse des opérateurs.

Toutefois, parce qu'elle demande d'effectuer plusieurs tâches en même temps, elle influence négativement les performances de l'opérateur concernant la tâche principale, et permet de poser moins de questions que la SAGAT (Endsley, 2015a). En conséquence, elle

discrimine moins bien les compétences d'évaluation des situations que la SAGAT et paraît peu appropriée aux situations de conduite.

5.3.2 *Comportements oculomoteurs*

L'étude du comportement oculomoteur des conducteurs est l'approche la plus courante pour évaluer les compétences perceptives et cognitives des conducteurs (Beanland et al., 2013; McDonald et al., 2015). Elle permet d'identifier les stratégies d'exploration visuelle des situations routière et les mécanismes de recherche et de détection des dangers (Gugerty, 2011). De ce fait, certains auteurs considèrent que l'oculométrie propose une mesure directe des compétences d'évaluation de la situation (Crundall et al., 2012; Taylor et al., 2013).

5.3.2.1 *Mesurer les comportements oculomoteurs*

Les indicateurs oculométriques sont basés sur les fixations et saccades du regard (Salvucci & Goldberg, 2000). Une fixation est un arrêt du regard sur un endroit ou un objet de la situation, pendant une durée supérieure à 100ms (Crundall et al., 2002; G. Underwood, Chapman, Bowden, & Crundall, 2002). Une saccade se définit avant tout comme n'étant pas une fixation (Chapman & Underwood, 1998). Il s'agit des mouvements oculaires qui se situent à +1 écart-type de la localisation moyenne des fixations calculées dans une situation donnée (G. Underwood, Chapman, Brocklehurst, Underwood, & Crundall, 2003).

Par ailleurs, la caractéristique « située » des compétences (Leplat & Montmollin (de), 2001; Wittorski, 1998) implique l'impossibilité d'établir des valeurs de référence pour mesurer les compétences par l'utilisation des comportements oculomoteurs. En effet, nous avons vu chacune des situations d'évaluation présentées possède ses propres particularités susceptibles d'affecter le déploiement des compétences. C'est pourquoi les études recensées utilisent systématiquement un paradigme comparatif expert/novice ou entraînés/non-entraînés pour mesurer les compétences par le biais des comportements oculomoteurs (voir par exemple Crundall et al., 2012; Fisher, Pollatsek, & Pradhan, 2006).

La littérature distingue deux types d'indicateur oculomoteurs. Les indicateurs de schémas d'exploration visuelle de la route correspondent à l'ensemble des fixations et des saccades effectuées par un conducteur dans une situation de conduite normale ou dangereuse, sur une durée continue de plusieurs secondes (Chapman & Underwood, 1998). Les indicateurs situationnels, cherchent à observer la présence d'une fixation, en rapport avec la présence d'un élément d'intérêt dans la situation, en général un danger ou une zone de danger. Dans ce cadre, les indicateurs les plus utilisés sont la détection de cet élément d'intérêt, la vitesse de cette détection, après son occurrence et la durée durant laquelle il est fixé après avoir été détecté (voir tableau 10).

Les indicateurs de vitesse de détection et de durée de fixation peuvent être exprimés selon deux approches. La première exprime le temps de façon absolue (voir par exemple Crundall et al., 2002; Petzoldt, Weiß, Franke, Krems, & Bannert, 2013; Yeung & Wong, 2015). Elle correspond au temps en seconde entre l'apparition de l'élément d'intérêt dans la situation et la première fixation sur cet élément. La seconde exprime un temps relatif (Crundall et al., 2012). La vitesse de détection ou la durée de fixation sont rapportées à la durée pendant laquelle l'élément d'intérêt était disponible à l'exploration visuelle. Les indicateurs sont donc exprimés comme une fraction de cette durée. Cette approche est notamment utilisée dans les études en simulateur, pour compenser les différences interindividuelles de vitesse susceptibles d'affecter la standardisation du protocole expérimental (Crundall et al., 2012).

Les **différences entre situations normales et dangereuses**, peuvent être explorées par l'analyse des schémas d'exploration visuelle de la route. En situation normale, l'exploration prend la forme d'une ellipse dont la majorité des fixations se situent le plan horizontal et une

minorité sur le plan vertical (Chapman & Underwood, 1998). Le regard est dirigé droit devant, au niveau de la zone de la route que le véhicule abordera dans quelques secondes (Mourant & Rockwell, 1972; G. Underwood, 2007; G. Underwood et al., 2003). Ces fixations centrales sont associées à des saccades oculaires de larges amplitudes. Le regard balaye régulièrement les côtés de la route (G. Underwood, 2007; Velichkovsky, Joos, Helmert, & Pannasch, 2005).

Par ailleurs, dans une situation difficile ou dangereuse, la scène visuelle peut faire l'objet d'une perception active, dirigée par la vision focale (Gugerty, 2011; Leibowitz & Owens, 1977; Velichkovsky et al., 2005). Les fixations sont plus longues et plus nombreuses sur les éléments dangereux, en comparaison des éléments non dangereux, et l'amplitude des saccades est restreintes autour de ces éléments (Chapman & Underwood, 1998; Crundall et al., 2002; G. Underwood, Phelps, Wright, Van Loon, & Galpin, 2005; Velichkovsky, Rothert, Kopf, Dornhoefer, & Joos, 2002). Par ailleurs, les conducteurs peuvent démontrer des comportements de recherche du danger, en fixant plus longtemps les éléments de l'environnement susceptibles d'en cacher l'apparition (Fuller, 2005; Pradhan et al., 2005).

Par exemple, la figure 27 (Chapman & Underwood, 1998) compare l'exploration d'une situation contenant un danger avec l'exploration visuelle d'une situation normale. On observe que dans le cas d'une situation normale, les conducteurs ont une exploration de la scène plus large par rapport au milieu de la route qu'en situation dangereuse.

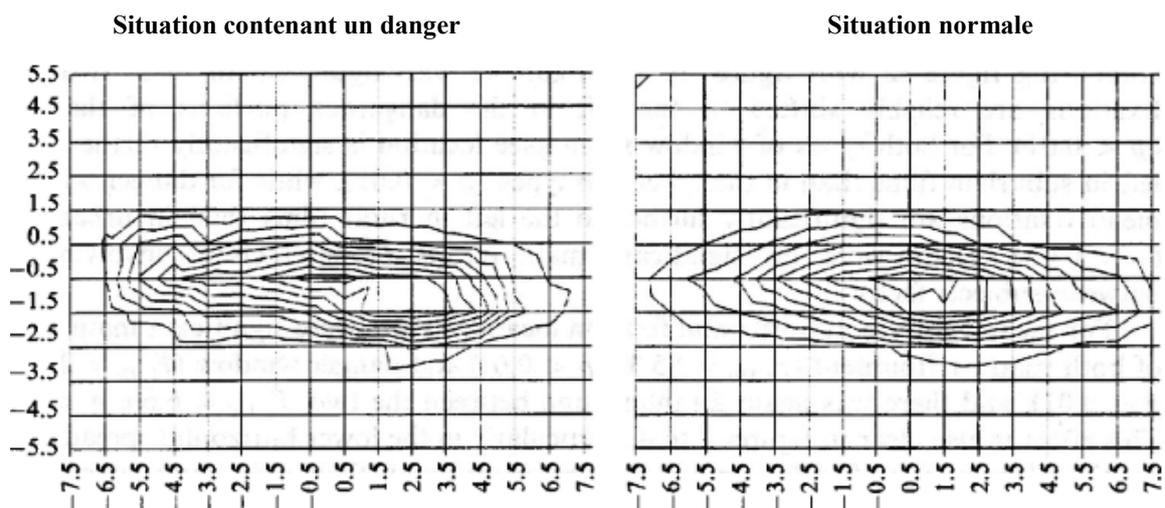


Figure 27, carte d'exploration visuelle de situations urbaines contenant un danger et des situations normales. En abscisse les degrés horizontaux d'exploration visuelle. En ordonnées, les degrés verticaux d'exploration visuelle— tirés de Chapman & Underwood, 1998

Par ailleurs des différences inter-conducteurs, fonction de l'expérience de conduite, sont constatées tant en situations normales que dangereuses. En situation normale, l'analyse des schémas d'exploration visuelle de la route révèle que les conducteurs novices balayent moins largement la route des yeux, concentrant leur regard au niveau du capot de leur véhicule. Au contraire, les experts regardent plus fréquemment les côtés de la chaussée et leurs rétroviseurs (Chapman & Underwood, 1998; Mourant & Rockwell, 1972; G. Underwood et al., 2002, 2003). De plus, les experts adaptent davantage leurs schémas d'exploration aux différents contextes de la conduite, quand les novices restent rigides et figés sur des schémas d'exploration fixes (G. Underwood, 2007)

En situation dangereuse, on les conducteurs expérimentés/entraînés démontrent plus de comportements oculomoteurs adaptés à la détection et à l'évitement des dangers (voir tableau

10). Ainsi, les conducteurs expérimentés ou entraînés détectent plus souvent les zones de danger couvert, et regardent plus longtemps les dangers potentiels ouverts en comparaison des novices/non entraînés (Crundall et al., 2003, 2012; Fisher et al., 2006; Fuller, 2005; Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006, 2005; Vlakveld et al., 2011). Par ailleurs, les conducteurs expérimentés ou entraînés détectent plus souvent les dangers dans les situations ouvertes et couvertes que les novices/non-entraînés (Borowsky, Shinar, & Oron-Gilad, 2010; Crundall et al., 2012, 2002; Petzoldt et al., 2013; Pradhan et al., 2011).

5.3.2.2 *Limites de l'approche oculométrique*

Cependant, les indicateurs oculométriques ne sont pas toujours efficaces pour évaluer les compétences perceptives et cognitives. Par exemple, dans un paradigme en simulateur, Vlakveld et al., (2011) observent que 94% des conducteurs entraînés fixent le camion de manière anticipatoire (situation test couverte), contre 70% des non-entraînés. Or, ces résultats ne sont pas retrouvés par Crundall et al., (2012), qui opposent cette fois des conducteurs expérimentés à des novices dans des situations similaires (voir tableau 10, ligne : détection de la zone de danger potentielle). En effet, dans leur étude, tous les types de conducteurs détectent aussi souvent, aussi rapidement et regardent aussi longtemps les éléments cachant un danger potentiel. Pourtant les expérimentés y détectent l'apparition du danger plus rapidement (voir tableau 10, ligne : vitesse de détection du danger). Les auteurs interprètent cette différence comme la présence d'une surveillance passive de l'élément cachant le danger par les conducteurs expérimentés. Une telle surveillance serait d'après eux préférable à une surveillance active, plus coûteuse en ressource. Or, une telle surveillance passive est indétectable par un indicateur oculométrique.

Des résultats mitigés sont également constatés sur la vitesse de détection des dangers (voir tableau 10, ligne : vitesse de détection du danger). Par exemple, dans l'étude de Yeung et al., (2015) des conducteurs novices et expérimentés sont confrontés à des situations dangereuses couvertes en vidéo. Les résultats en vitesse absolue ne montrent pas de différence entre les groupes de conducteur. Ce n'est pas le cas dans l'étude de Crundall et al., (2012), qui calculent les vitesses de détection en valeurs relatives. En effet, les conducteurs expérimentés détectent significativement plus rapidement les dangers couverts et ouverts que les conducteurs novices. Une explication principale de cette différence pourrait être le mode de présentation des situations dangereuses (vidéo VS. Simulateur). En effet, dans un paradigme en vidéo, la tâche du participant est uniquement une tâche de détection danger. Dans un paradigme en simulateur, il s'agit d'une tâche d'évitement du danger. Par conséquent, les conducteurs expérimentés dans la tâche simulateur pourraient être plus impliqués dans la tâche, puisqu'il est de leur responsabilité d'éviter une collision. Au contraire, dans la tâche vidéo, leurs agissements n'ont pas d'influence sur le déroulé du scénario. Toutefois, cette mesure de vitesse de détection est peu utilisée dans la littérature, si bien que les deux études citées sont les seules que nous avons trouvées qui l'utilisent. Pourtant, la vitesse de déclenchement d'une manœuvre d'évitement pourrait être directement fonction de la vitesse de détection du danger.

Une limite supplémentaire est l'impossibilité d'effectuer des comparaisons inter-situations sur ces indicateurs. Cette impossibilité est notamment due à la forte hétérogénéité des situations et des mesures utilisées (voir tableau 10, colonne : nombre de situations tests différentes utilisées) ainsi qu'à la caractéristique située des compétences (Leplat & Montmollin (de), 2001; Wittorski, 1998). Pourtant, les résultats des différentes études montrent que certaines situations pourraient être plus faciles à évaluer que d'autres. Par exemple, dans l'étude en simulateur de Pradhan et al., (2005), seul 5% des conducteurs novices regardent l'élément cachant un danger potentiel lorsqu'il s'agit d'un élément statique haute, contre 29% des expérimentés. Or, dans la même étude, ce sont plus de 10% des novices et 57% expérimentés

qui regardent l'élément cachant un danger potentiel lorsqu'il s'agit d'un élément potentiellement mobile de type camion. Des résultats similaires pour les expérimentés sont retrouvés dans l'étude de Crundall et al. (2012).

Enfin, une dernière limite est plus fondamentale et implique le manque de connaissances actuelles concernant les relations entre le comportement oculomoteur et les processus cognitifs sous-jacents (Feng, 2003; Salvucci & Goldberg, 2000; Wedel & Pieters, 2008). En effet, les mouvements oculaires dépendent d'une multitude de processus cognitives concomitants (Kok & Jarodzka, 2017). Par exemple, la fixation rapide sur un danger couvert peut être due tant aux compétences d'anticipation qu'au phénomène de capture attentionnelle (Gugerty, 2011; Yantis & Jonides, 1984, 1990). Par conséquent, une inférence directe des compétences sur la base des indicateurs oculomoteurs est impossible.

Tableau 10, exemples d'indicateurs oculométriques utilisés pour mesurer les compétences d'évaluation, avec intervalles de valeurs observées par catégorie de conducteur

Indicateurs	Méthode de calcul	Type de paradigme	Exemples de résultats significatifs		Situation – cible (si précisée par les auteurs, sinon moyenne)	Matériel	Nombre de situations test différentes		Etudes correspondantes
			Expérimentés / Entraînés	Novices / Non entraînés			Ouvertes	Couvertes	
Détection de la zone de danger potentielle	Fixation sur l'indice préfigurant du danger	Experts/novices	29%	5%	Couverte – haie	Simulateur	8	5	(Pradhan et al., 2005)
		Idem	57%	10%	Couverte – camion	Idem	Idem	Idem	Idem
		Expert/novices	50%	58%	Couverte – moyenne	Simulateur	4	3	(Crundall et al., 2012)
		Entraînement	94%	70%	Couverte – camion	Simulateur	3	10	(Vlakveld et al., 2011)
Durée de fixation la zone de danger potentielle	Relative	Expert/novices	12%	10%	Couverte – moyenne	Simulateur	4	3	(Crundall et al., 2012)
		Idem	32%	10%	Ouverte – moyenne	Simulateur	Idem	Idem	Idem
Vitesse de détection du danger	Absolue	Expert/novices	[400 – 500]	[400 – 500]	Couverte – Moyenne	Vidéo	Non	4	(Yeung & Wong, 2015)
	Relative	Expert/novices	30%	50%	Couverte – Moyenne	Simulateur	4	3	Crundall et al., 2012
			20%	42%	Ouverte – Moyenne				

5.3.3 Comportements de conduite

Pour compenser les limites de l'oculométrie, une approche prometteuse mais peu utilisée dans ce cadre serait de les combiner à des mesures du comportement de conduite. Cette approche évalue les compétences perceptives et cognitives par l'analyse des actions des conducteurs en situation de conduite, et des effets de ces actions sur ladite situation (M. Green, 2000). Par définition utilisable uniquement sur simulateur ou sur route réelle, cette approche est peu utilisée en comparaison de l'approche oculométrique. Parmi les méthodes comportementales, on trouve ainsi l'analyse des variations de vitesse, des freinages, et des collisions des conducteurs.

5.3.3.1 Variations de vitesse

Pour Fuller (2005), une manœuvre anticipatoire pour éviter un danger potentiel, pourrait être de ralentir avant d'arriver au lieu dudit danger. L'analyse des variations de vitesse est la plus courante dans l'approche par analyse des comportements de conduite. Elle propose d'observer la diminution de la vitesse en fonction de la distance séparant le conducteur du lieu d'un danger potentiel. L'observation des variations de vitesse pourrait donc être une piste pour compenser les limites de l'oculométrie.

Des comportements de ralentissements sont constatés dans plusieurs études, opposant des conducteurs expérimentés à des conducteurs novices, ou des conducteurs ayant reçu un entraînement aux compétences perceptives et cognitives et des conducteurs non entraînés. Les auteurs observent notamment que les entraînés ralentissent plus précocement avant d'arriver au lieu du danger que les conducteurs non entraînés (Crundall et al., 2010, 2012; G. Underwood, Crundall, & Chapman, 2011; Wang et al., 2010). Ces différences sont usuellement constatées entre 30 et 40m du lieu du danger potentiel (voir figure 28).

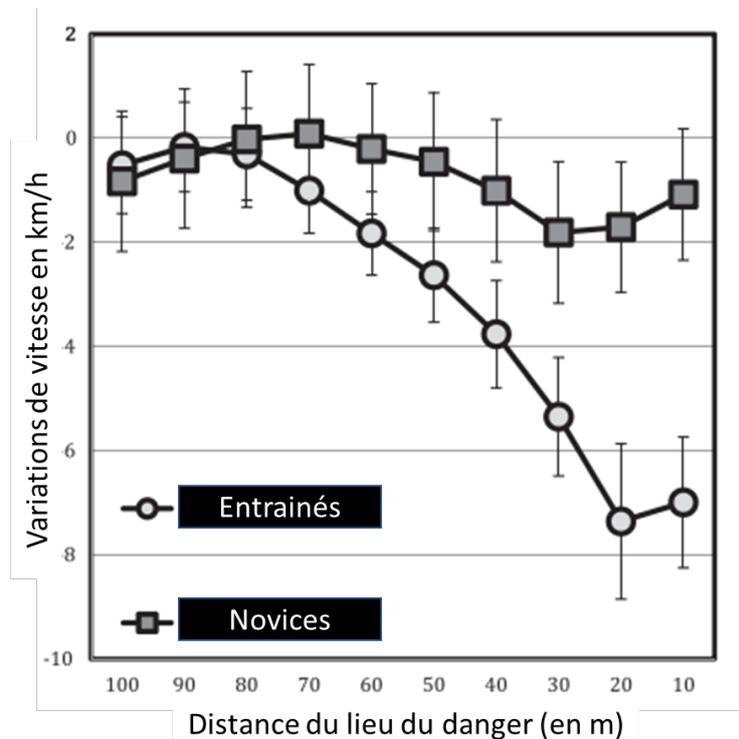


Figure 28, variations de vitesse de conducteurs entraînés aux compétences perceptives et cognitives et de conducteur novices – tirés de Crundall et al., 2010

Toutefois, certains résultats sont mitigés et ne permettent pas d'observer de différences entre les catégories de conducteurs. En simulateur, Crundall et al. (2012) confrontent des conducteurs expérimentés, des apprenants et des très expérimentés (enseignants de la conduite) à des situations ouvertes et couvertes. Ils observent les variations de vitesse brutes en km/h, à partir de 100m avant l'arrivée au lieu du danger. Ils constatent un schéma de ralentissement anticipatoire similaire pour l'ensemble des conducteurs. A l'instar des résultats constatés dans la littérature, tous les conducteurs commencent à ralentir fortement à partir de 40m avant le danger.

Cependant, les auteurs observent que les expérimentés vont en moyenne plus vite que les autres conducteurs, alors que les enseignants sont moins rapides que les apprenants. Par conséquent, les données de variations de vitesse pourraient en fait mesurer des différences de style de conduite plutôt que de compétences perceptives et cognitives. En effet, bien qu'ayant une conduite plus rapide, les expérimentés pourraient ralentir plus fortement que les apprenants à l'approche du lieu du danger. Cette différence pourrait être observée en mesurant les variations de vitesse des conducteurs relativement à leur vitesse initiale et non l'évolution de la vitesse brute en km/h. Une telle relativisation pourrait permettre la comparaison inter-catégorie permettant d'évaluer l'effet de l'expérience sur les compétences.

5.3.3.2 Freinages

En conduite, les ralentissements importants de l'allure sont notamment dus à des actions de freinage. Les caractéristiques et particularités des freinages des conducteurs sont parmi les plus anciennes mesures d'évaluation du comportement des conducteurs (Johansson & Rumar, 1971; Taoka, 1989). Ces mesures sont majoritairement centrées autour du calcul de temps de réaction entre l'apparition d'un danger et le freinage du conducteur (M. Green, 2000; Kusano, Chen, Montgomery, & Gabler, 2015; Stanisław Jurecki, Lech Stańczyk, & Jacek Jaśkiewicz, 2017; Summala, 2014).

Les temps de réaction au freinage sont influencés par les caractéristiques de l'apparition du danger ou de l'obstacle sur la route (voir tableau 11 ; M. Green, 2000). Les temps de réaction au freinage les plus longs ont lieu lors des situations d'intrusions, dans lesquelles l'apparition de l'obstacle ne peut raisonnablement pas être anticipée par le conducteur. Les temps de réaction les plus courts ont lieu lors de situation où le freinage est « prévu », c'est-à-dire que le conducteur sait qu'il devra freiner à l'apparition d'un signal dans l'environnement, dont il connaît la localisation. Entre les deux se situent les situations dans lesquelles le freinage n'est pas prévu, mais peut être anticipé (situation prévisible).

Tableau 11, Classification des situations et valeurs de référence des temps de réaction au freinage de Green, 2000

<u>Type de situation</u>	<u>Valeurs de référence moyenne (en ms)</u>
Situation « prévue »	[700 – 750]
Situation « prévisible »	1250
Situation « d'intrusion »	1500

A notre connaissance, les différences de temps de réaction au freinage dans les situations « prévisibles » n'ont pas été utilisées pour évaluer les compétences perceptives et cognitives. Or, de telles différences pourraient être attendues entre conducteurs expérimentés et novices, dans ces situations.

5.3.3.3 Collisions

Les ralentissements et freinages en situation contenant un danger ont pour objectif d'éviter une collision. Par conséquent, les collisions pourraient être un indicateur supplémentaire pour l'évaluation des compétences de conduite perceptives et cognitives. Cet indicateur est cependant rarement utilisé pour discriminer les conducteurs, et nécessite davantage de travaux pour être validé. Deux solutions existent pour mesurer le nombre de collision en simulateur.

La première consiste en un décompte manuel par l'expérimentateur du nombre de collisions entre le conducteur et le danger (R. W. Allen et al., 2011; Ivancic & Hesketh, 2000; Paxion, Galy, & Berthelon, 2015). Dans l'étude de Paxion et al., (2015), jusqu'à 1 conducteur novice sur 3 pouvait subir une collision dans une situation contenant un danger couvert. Ce chiffre tombait à 1 sur 10 pour les expérimentés. Toutefois, cette solution nécessite une importante fidélité visuelle du simulateur. En effet, le rendu 3D doit être suffisamment précis pour assurer la présence d'une collision entre l'objet 3D du véhicule du conducteur et l'objet 3D du danger.

La seconde consiste à utiliser le « plus faible » *Time to Collision* (TTC) observé durant l'entièreté d'une situation contenant un danger (Stahl, Donmez, & Jamieson, 2014). Le *time to collision* (TTC) exprime la quantité de temps séparant deux objets de l'environnement (ex. un conducteur et un danger) d'une collision, si les protagonistes ne changent ni de trajectoire ni de vitesse (D. N. Lee, 1976; Minderhoud & Bovy, 2001). Par conséquent, le « plus faible TTC » exprime le temps minimum ayant séparé le véhicule du conducteur du danger durant la situation d'évaluation. Dans ces conditions, un « plus faible TTC » égal ou très proche de zéro indiquerait une collision entre le conducteur et le danger.

Toutefois, une seule étude à notre connaissance utilise le « plus faible TTC » pour évaluer les compétences des conducteurs. Or, elle ne fait pas apparaître de différence entre conducteurs expérimentés et novices. Stahl et al., (2014), comparent des conducteurs novices et des conducteurs expérimentés sur leurs « plus faible TTC » dans 4 scénarios contenant un danger. Les plus faibles TTC recueillis étaient situés entre 6 et 12 secondes, bien loin d'une collision potentielle. Par ailleurs, les auteurs n'observent pas d'effet de l'expérience, dans aucun des 4 scénarios. Cependant, les scénarios utilisés par les auteurs étaient tous de type ouvert et présentaient des dangers visibles bien en amont. De ce fait, les conducteurs pourraient avoir eu le temps d'anticiper le comportement potentiellement dangereux d'un conducteur (M. Green, 2000). Par conséquent, davantage d'investigations, notamment sur des situations de danger couvert, sont nécessaires pour valider ou invalider cet indicateur pour l'évaluation des compétences.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par identifier la mesure de l'effet de transfert comme une méthodologie efficace pour évaluer l'efficacité d'un entraînement (Rolfe & Caro, 1982). Parmi les protocoles pour évaluer le transfert, le plan consistant à opposer un groupe de conducteur ayant reçu l'entraînement à un groupe de conducteur n'ayant pas reçu l'entraînement est indiqué comme étant le plus efficace, et est également le plus utilisé (Crundall et al., 2010; Rolfe & Caro, 1982; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Par ailleurs, un effet de transfert est constatées sur les situations similaires, proches et lointaines (Crundall et al., 2010; Ivancic & Hesketh, 2000; Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006; Vlakveld et al., 2011). Ces dernières apparaissent donc efficaces pour évaluer l'efficacité de la formation en simulateur. Ces situations ont la particularité de posséder la même structure que la situation d'apprentissage, mais des traits de surface différents. Les situations similaires

possèdent des traits de surface strictement identiques à ceux de la situation d'apprentissage. Les situations lointaines n'en possèdent aucun. Les situations proches se situent entre les deux.

Par ailleurs, l'évaluation du transfert n'est possible qu'en disposant d'indicateurs d'acquisition des compétences fiables, et de situations adaptées pour évaluer ces dernières. Nous avons identifié les situations et indicateurs utilisés pour mesurer les compétences perceptives et cognitives (voir tableau 12).

Tableau 12, compétences mesurées en fonction des indicateurs et des types situations contenant un danger

Situations Indicateurs	Situations couvertes		Situations ouvertes
	Objet cachant le danger	Danger	Danger potentiel/ danger
Vitesse de détection	Perception Compréhension	Perception	Perception Compréhension
Durée de fixation	Compréhension Projection	X	Compréhension Projection
Freinage : temps de réaction	X	Prise de décision : anticipation	Prise de décision : anticipation
Variation de vitesse : ralentissement	Prise de décision : anticipation	X	
Collisions	X	Prise de décision : anticipation	

Dans le cadre de notre objectif, nous retenons les indicateurs basés sur une approche comportementale. Ces derniers comprennent les indicateurs oculométriques ainsi que les indicateurs de comportements de conduite. En effet, ils proposent une méthode directe de mesure des compétences. Les compétences sont en effet évaluées directement à partir de comportements écologiques, récupérés en situation conduite. De plus, ces indicateurs sont efficaces pour évaluer les compétences de perception et de prise de décision des conducteurs. Au contraire, nous ne retenons pas les indicateurs basés sur une approche verbale. En effet, bien qu'efficaces, ces indicateurs proposent une approche indirecte pour l'évaluation des compétences perceptives et cognitives. En effet, les compétences ne sont pas évaluées par l'analyse des comportements de conduite en situation, mais plutôt par l'interprétation d'un rapport verbal, hors de la situation.

Toutefois, ces indicateurs possèdent plusieurs limites à dépasser. En premier lieu, l'analyse des comportements oculomoteurs ne parvient pas toujours à différencier les conducteurs novices des conducteurs expérimentés, en particulier sur leurs compétences de compréhension et d'anticipation (Crundall et al., 2012; Stahl et al., 2014). D'autres, comme les temps de réaction au freinage, abordent la question de l'anticipation des dangers mais pas sous l'angle des effets de l'expérience (M. Green, 2000). Du point de vue méthodologique, ces indicateurs sont de plus utilisés de façon hétérogène (Crundall et al., 2010, 2012; Wang et al., 2010; Yeung & Wong, 2015), ou restreints à quelques études isolées (Paxion et al., 2015; Stahl et al., 2014). Par ailleurs, certains choix méthodologiques dans le traitement des données de certains indicateurs comme les variations de vitesse, pourraient empêcher de constater un effet de l'expérience (Crundall et al., 2012).

L'utilisation d'indicateurs combinés pour l'évaluation des compétences perceptives et cognitives pourrait permettre de dépasser certaines limites. En effet, la conduite est une activité dynamique et complexe, visuelle aussi bien que motrice (Gugerty, 2011; Jeong et al., 2006; Owsley & McGwin, 2010; Walter et al., 2001). Par exemple, plus la détection du danger est rapide, plus le freinage subséquent l'est aussi. De manière étonnante, aucune étude à notre connaissance n'utilise une combinaison d'indicateurs pour mesurer les compétences. Or, la combinaison de comportements oculométriques et de conduite (ex. délai entre fixation sur le danger-freinage subséquent) pourrait permettre de mesurer les compétences de prise de décision anticipatoire de façon explicite (M. Green, 2000). Ces combinaisons pourraient également permettre d'identifier des comportements de recherche active des dangers (Pradhan et al., 2005). Par exemple, un regard positionné à proximité du lieu d'apparition potentiel du danger, avant que ce dernier n'apparaisse, pourrait indiquer de bonnes compétences d'anticipation chez un conducteur.

Une perspective supplémentaire concerne l'outillage technique du simulateur pour l'acquisition des indicateurs. En effet, la mesure et le traitement de ces données est complexe, et fait appel à de multiples approches, parfois coûteuses du point de vue économique ou logistique (ex. codage manuel de données oculométrique nécessitant plusieurs expérimentateurs ; voire par exemple Crundall et al., 2012; Pradhan et al., 2005; Vlakveld et al., 2011). Cette complexité pourrait expliquer pourquoi certains indicateurs (ex. vitesse de détection des danger, TTC) sont peu utilisés dans la littérature, en dépit de leur potentiel important d'évaluation des compétences. Une solution pourrait être l'interfaçage technologique entre les différents systèmes responsables des situations de test, des mesures oculométriques et des mesures comportementales. En effet, un système combinant un contrôle fin du scénario et des mesures précises, sur la base de paramètres prédéfinis, allègerait nettement le traitement des données, en plus de proposer une flexibilité expérimentale importante. Par exemple, le calcul de la vitesse de détection du danger pourrait être facilité si une zone d'intérêt visuelle était directement insérée dans l'environnement 3D de la situation de test (ex. le piéton dans une situation couverte). En effet, lors de la détection d'une fixation dans cette zone, le système pourrait calculer automatiquement la vitesse de cette détection, au regard de la durée de disponibilité de la zone, de la vitesse et de l'amplitude des saccades, de l'allure du conducteur, du TTC, etc. Un tel interfaçage permettrait alors d'une part de faciliter l'accès à certains indicateurs et, d'autre part, de faciliter l'accès à des indicateurs combinés, rarement utilisés.

6 Problématique

Ce travail de thèse s'inscrit dans une double perspective. Il s'agit sur un versant théorique, de mieux comprendre le développement des compétences de conduite nécessaires à l'efficacité et à la sécurité au cours des premiers mois après le permis de conduite, en vue d'améliorer les conditions de leur développement. Il s'agit sur un versant plus applicatif, de contribuer au développement des outils de simulation et de réalité virtuelle pour l'apprentissage, afin de les rendre plus efficaces en amont de la conduite en autonomie. Ces perspectives se traduisent plus concrètement en un double objectif : identifier les compétences de haut niveau acquises lors des premiers mois de la conduite en autonomie, ainsi que les situations et mécanismes associés à cette acquisition ; proposer et valider des nouveaux outils de réalité virtuelle et de simulation pour l'évaluation et l'acquisition de ces compétences par les conducteurs novices.

En effet, l'apprentissage des compétences de conduite est en majorité expérientiel et pratique (Brehmer, 1994; A. Y. Kolb & Kolb, 2012; A. F. Williams, 2013). La diminution du surrisque durant les premiers mois de conduite autonome (Mayhew, Simpson, & Pak, 2003; McCartt et al., 2003) laisse penser que l'ensemble des compétences nécessaires à une conduite sûre et efficace n'est pas acquis durant le cursus d'apprentissage. Par conséquent, l'apprentissage des compétences se poursuit « sur le tas », durant les premiers temps de la conduite autonome. La première étude concerne l'identification des mécanismes du développement des compétences de conduite de haut niveau durant les premiers mois de conduite post-permis. Nous faisons notamment l'hypothèse que c'est au travers de l'expérience de situations critiques de conduite (nouvelles, difficiles, risquées ou perçues comme risquées) que sont développées « sur le tas » les compétences. Nous cherchons ainsi à identifier les caractéristiques des situations réelles durant lesquelles ces compétences sont mises en œuvre et pourraient être acquises.

Après avoir identifié les situations mobilisant ces compétences, notre second objectif vise à identifier des approches fiables pour les mesurer. Dans notre seconde étude, nous proposons un paradigme en simulateur de conduite pleine échelle destiné à identifier des indicateurs d'acquisition des compétences perceptives et cognitives susceptibles de pallier en partie aux limites des indicateurs actuels. En particulier, nous nous concentrerons sur les compétences d'évaluation de la situation et de prise de décision nécessaires à l'anticipation des dangers routiers. En effet, une défaillance de ces compétences est un des facteurs prépondérant des accidents de la route (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; Seacrist et al., 2018). De plus, plusieurs travaux montrent que l'acquisition de ces compétences est directement fonction de l'expérience de conduite (Brehmer, 1994; Fuller, 2005; Williams, 2013).

L'identification de situations et d'indicateurs d'acquisition des compétences de conduite perceptives et cognitives permet alors de passer à la dernière étape de notre travail. Celle-ci consiste en la mise au point d'un protocole de formation destiné à favoriser l'apprentissage des compétences de conduite perceptives et cognitives, « par » simulateur de conduite. En particulier, il s'agira d'évaluer deux modalités de rétroactions formatives inusitées pour favoriser l'apprentissage des compétences d'anticipation des dangers routiers.

6.1 Identifier les caractéristiques des situations réelles impliquées dans l'acquisition des compétences de conduite de haut niveau

Contrairement aux compétences techniques, les compétences de haut niveau seraient maîtrisées tardivement par les conducteurs, après une expérience conséquente de la conduite autonome (Deery, 1999; McKnight & McKnight, 2003; Williams, 2013). Cependant, les compétences de haut niveau sont diverses, et toutes ne sont pas sollicitées de la même façon

lors de l'activité de conduite. Les compétences perceptives et cognitives servent à la maîtrise des situations de conduite. Notamment, elles servent à naviguer efficacement dans l'environnement, et à y anticiper les risques éventuels. Les compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles servent à maîtriser le contexte de la conduite. Elles permettent ainsi de réguler les effets délétères de l'état interne du conducteur, de ses traits de personnalité à risque et de son environnement social (fatigue, stress et confiance, traits de personnalité à risque, pressions sociales, auto-évaluation des compétences techniques, perceptives et cognitives).

Par conséquent, une première question exploratoire concerne l'identification des liens entre l'expérience de situations de conduite et l'apprentissage subséquent des compétences de conduite de haut niveau. Par exemple, il s'agira d'identifier si l'échec ou la réussite dans la maîtrise d'une situation de conduite dangereuse ou difficile (ex. nouvelle, ambiguë, mal maîtrisée) favorise le développement subséquent des compétences de conduite perceptives et cognitives qu'elle sollicite. De même, il s'agira d'identifier si l'échec ou la réussite dans la maîtrise d'un contexte difficile de conduite interviennent dans le développement des compétences de conduite d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles. Dans le cadre de notre objectif final, le recensement et l'identification de tels liens nous permettra d'identifier les situations critiques pour l'apprentissage des compétences perceptives et cognitives. Une telle identification serait alors susceptible d'orienter nos choix quant aux situations à opérationnaliser pour l'évaluation et l'entraînement des compétences.

6.2 Proposition de situations et d'indicateurs associés pour mesurer les compétences perceptives et cognitives en réalité virtuelle

Les défaillances des compétences perceptives et cognitives sont les plus impliquées dans les situations dangereuses rencontrées par les conducteur novices (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003). Dans ce contexte, l'évaluation de ces compétences constitue un enjeu majeur pour leur compréhension, mais également pour le développement d'outils de simulation pour leur apprentissage. Actuellement, les travaux engagés ne tiennent qu'en partie compte du type de situations d'évaluation utilisée, en lien avec les compétences qu'il mobilise (ex. Pradhan et al., 2005). De plus, parce qu'ils sont utilisés de façon isolée, les indicateurs peinent parfois à mesurer avec précision certaines compétences telles l'anticipation (Crundall et al., 2012). Par conséquent, nous proposons ici une approche prenant à la fois en compte le contexte de la situation d'évaluation et proposant des indicateurs « combinés », adaptés à la mesure des compétences perceptives et cognitives.

La mobilisation d'une compétence est avant toute dépendante de la tâche à accomplir, et de la situation dans laquelle elle prend place (Falzon et al., 2014; Leplat & Montmollin (de), 2001). La mesure d'une compétence doit donc impérativement être située et contextualisée. Cela implique une opérationnalisation stricte des situations d'évaluation, afin qu'elles sollicitent sans ambiguïté la compétence à mesurer. Dans ce cadre, nous avons identifié 2 types de situations susceptibles de mobiliser les compétences perceptives et cognitives nécessaires à l'anticipation des dangers routiers. Dans les situations couvertes le conducteur doit anticiper l'éventualité d'un danger à venir qui n'est pas encore visible. Dans les situations ouvertes, le conducteur doit surveiller en permanence un autre usager, dont il doit anticiper le comportement. Un troisième type de situation, les situations d'intrusion, sera ajouté afin de servir de contrôle. En effet, ces situations engagent des comportements similaires à ceux démontrés dans les autres situations, mais le danger ne peut y être anticipé. Les compétences perceptives et cognitives n'y interviennent donc pas.

En plus de situations appropriées, l'évaluation nécessite des indicateurs capables d'isoler de façon efficace la mesure des compétences. Pour mesurer précisément les

compétences d'anticipation, nous proposons dans ce sens l'utilisation d'indicateurs « combinés ». Nous entendons par là la combinaison de plusieurs indicateurs mesurant des comportements différents (ex... détection du danger, temps de réaction au freinage) en un seul indicateur composite (ex. temps de réaction au freinage après la détection du danger). Dans le cadre d'une évaluation située des compétences, une telle combinaison pourrait permettre de mesurer efficacement les compétences d'anticipation. Par exemple, le calcul d'un indicateur de temps de réaction au freinage, après avoir détecté le danger permettrait d'accéder de façon isolée aux compétences d'anticipation des conducteurs (M. Green, 2000). En effet, si le temps de réaction au freinage, après avoir détecté le danger est plus court dans les situations couvertes (anticipation) que d'intrusion (pas d'anticipation), alors cet indicateur sera pertinent pour mesurer les compétences d'anticipation des conducteurs.

6.3 Evaluation de modalités de rétroactions pour la formation des compétences perceptives et cognitives « par simulateur »

Sur la base des situations identifiées dans l'étude 1 et des principes de mesure des compétences dégagés dans l'étude 2, nous procéderons à l'évaluation comparée de l'efficacité de 2 modalités de rétroactions formatives pour l'apprentissage des compétences d'anticipation en réalité virtuelle. Cette étude observera deux parti pris expérimentaux.

Le premier est d'évaluer l'efficacité de l'entraînement par la mesure d'un effet de transfert basé sur la distance inter-situations en simulateur. En effet, deux modalités de transfert peuvent être utilisées pour évaluer l'apprentissage. La première modalité est le transfert des compétences apprises en simulateur sur la sécurité des conducteurs sur route réelle (Rolfe & Caro, 1982). La seconde modalité est de conserver le simulateur pour évaluer les effets de l'apprentissage sur d'autres types de situations, plus ou moins ressemblantes (Fisher et al., 2007; Ivancic & Hesketh, 2000; Vlakveld et al., 2011). Dans ce second cas, il s'agit alors d'évaluer le « transfert proche » et « lointain » de l'entraînement (Holyoak & Koh, 1987). Dans ce travail, nous choisissons la seconde modalité. En effet, en plus d'être économique, cette solution s'adresse directement aux mécanismes de diminution des accidents par un apprentissage expérientiel, observé lors des premiers temps de la conduite (McCart et al., 2003; Williams, 2013).

Le second est d'évaluer l'efficacité d'une formation « par simulateur », c'est-à-dire utilisant le simulateur comme un dispositif permettant l'exposition écologique du conducteur à des situations autrement difficilement accessibles. En effet, les effets de ce type de formation sur le développement des compétences sont peu clairs. Ainsi, toutes les études identifiées dans la littérature utilisent une approche « par erreur ». Cette modalité consiste à confronter directement les conducteurs à des situations contenant une situation de danger propice à un accident ou un presque accident. La rétroaction est alors constituée des conséquences de ces erreurs (ex. accident, presque accident, émotion forte) sur les conducteurs. Cependant, bien qu'ils tendent à démontrer leur efficacité, l'hétérogénéité du traitement rétroactif de l'erreur empêche de conclure sur l'efficacité de ce type de rétroaction (Ivancic & Hesketh, 2000; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). De plus, le type de modalité « par erreur » diffère entre les paradigmes. Un seul paradigme propose une approche basée sur la présence d'une action erronée dans une situation ne proposant pas de danger à priori (Ivancic & Hesketh, 2000). Les autres proposent une approche basée sur l'absence d'action dans une situation présentant un danger qu'il faut pourtant éviter (R. W. Allen et al., 2011; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Toutefois, ces dernières sont systématiquement accompagnées d'une rétroaction extradiégétique supplémentaire, empêchant ainsi d'évaluer l'efficacité réelle de l'approche.

Dans notre troisième étude, nous effectuons une comparaison inédite entre 2 modalités de rétroactions formatives immédiates. Cette dichotomie a pour objectif d'étudier l'efficacité

réelle des caractéristiques des rétroactions pour la formation des compétences perceptives et cognitives. La première modalité reprend les caractéristiques « par erreur » passive présentes dans la plupart des études (Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Au contraire de ces paradigmes cependant, celle-ci n'est pas suivie d'une explication à posteriori de la situation. La seconde est inédite à notre connaissance. Elle propose une approche immédiate, mais qui cette fois n'est pas basée sur les erreurs des conducteurs. Elle consiste à proposer directement l'explication de la situation aux apprenants, durant la situation de conduite. Le choix de se concentrer sur des rétroactions immédiates a été fait pour deux raisons. En premier lieu, ces dernières ont été identifiées comme étant les plus efficaces pour favoriser les apprentissages de haut niveau (Shute, 2008; Van der Kleij et al., 2015). En second lieu, ce choix a été guidé par l'objectif final du projet McCoy Critical. Ce dernier était de proposer des programmes d'entraînement capable de s'adapter en direct aux performances des apprenants. Cette adaptation visait en particulier à proposer en temps réel, des situations d'apprentissages propices au développement des compétences défaillantes.

Seconde partie : Etudes

7 Étude 1 : Qu'apprennent les conducteurs novices par l'expérience de situations critiques, lors des premiers temps de la conduite autonome ?

7.1 Introduction

Peu de données existent concernant les mécanismes d'apprentissage et de développement des compétences de conduite de haut niveau durant les premiers mois de la conduite autonome. Cette première étude explore les caractéristiques des situations de conduite critiques vécues lors de ces premiers temps, et l'apprentissage subséquent de compétences. Pour ce faire, nous interrogeons de façon semi-dirigée des conducteurs novices sur des situations critiques rencontrées durant les premiers temps de la conduite.

En effet, nous émettons l'hypothèse que cet apprentissage est basé, au moins en partie, sur l'expérience de situations critiques de conduite, au sens où ces situations « dépassent les capacités du conducteur, [...] permettant ainsi l'occurrence d'apprentissages et fournissant les opportunités nécessaires au développement de nouvelles compétences » (Burkhardt et al., 2016 - p. 3).

En ce sens, les situations critiques fourniraient la connaissance du résultat de l'action (Falzon et al., 2014), qui permet la prise conscience et la réflexion nécessaires à l'apprentissage de la compétence (D. A. Kolb & Kolb, 2012). Cette connaissance porte notamment sur l'échec ou la réussite de l'action, au regard du but. Elles sont ainsi « critiques » car particulièrement représentatives des situations qui médient le développement des compétences (Butterfield, 2005; Flanagan, 1954).

7.2 Matériel et méthode

7.2.1 Participants

Un échantillon de convenance de 48 conducteurs (18 garçons, 30 filles) a été interrogé. Les participants étaient âgés de 18 à 29 ans (âge moyen = 22 ans, écart-type = 2,5 ans) et possédaient leur permis depuis 3 ans en moyenne, avec de grandes disparités parmi eux (médiane = 2 ans et 3 mois ; écart-type = 2 ans et 4 mois). Le recrutement des participants a eu lieu d'avril à juillet 2016, sur 3 campus parisiens.

7.2.2 Entretiens semi-structurés basés sur la technique des incidents critiques

Le guide d'entretien est basé sur la technique des incidents critiques (Butterfield, 2005; Flanagan, 1954). Cette technique a initialement été développée pour réunir de manière effective et économique des informations sur les compétences nécessaires à la pratique sécuritaire et efficace d'un travail, en situation dynamique et complexe (voir Butterfield, 2011 pour revue). Cette méthode évite le recueil de récit généraux et stéréotypés, à la faveur d'un rapport temporellement précis et circonstancié d'événements d'intérêt pour l'investigation. De plus, elle permet un accès rapide et économique à des situations réelles autrement difficiles à investiguer. Enfin, cette méthode a récemment été utilisée pour identifier les compétences de haut niveau impliquées dans des activités complexes, dynamiques et à risque (Irwin & Poots, 2015).

Le guide d'entretien (tableau 13) commence par une phrase d'introduction invitant le participant à se rappeler de situations de conduite « difficiles ou à risques », vécues durant les deux premières années de conduite. Cette période de deux ans suivant l'obtention du permis correspond à la plus forte décroissance du sur-risque pour les conducteurs novices (Mayhew, Simpson, Desmond, & Williams, 2003; McCartt et al., 2003). Ces situations doivent avoir été personnellement vécues, ressenties comme difficiles ou risquées et pouvaient être « positives » ou « négatives », en concordance avec les directives de Flanagan (1954). Dans le cadre de

l'étude, les définitions des mots « positif » et « négatif » n'étaient volontairement pas précisés, de manière à le laisser le plus libre possible en termes de variété de situations rappelées.

La première question a pour objectif d'inciter le participant à décrire l'incident de la façon la plus détaillée et factuelle possible. Les questions subsidiaires et de relance complètent le rapport initial. Enfin, la dernière question a pour objectif d'inciter le participant à se rappeler d'autres situations équivalentes.

Tableau 13, Guide d'entretien semi-structuré comprenant les instructions initiale et finale (1 & 2), ainsi que les questions supplémentaires (a, b, c, d, e & f)

- 1. Pensez à une situation difficile ou à risque, personnellement expérimentée en tant que conducteur, qui a eu lieu durant les deux années ayant suivies l'obtention de votre permis et que vous avez vécu positivement (ou négativement)**
- a) Pourriez-vous nous décrire cette situation pas à pas, de la façon la plus détaillée possible ?
 - b) Pourriez-vous décrire les circonstances qui ont menées à cette situation ? Par exemple, étiez-vous stressé, fatigué ? De quelle humeur étiez-vous ? Connaissiez-vous la route ?
 - c) Pourriez-vous décrire votre réaction au moment de l'incident ?
 - d) Si vous vous retrouviez dans la même situation aujourd'hui, comment réagiriez-vous ?
 - e) Avec du recul, que vous a appris cet évènement ?
- 2. Vous rappelez vous d'un autre incident ? Si oui, pourriez-vous nous le raconter ?**

7.2.3 Procédure

Les participants sont interrogés individuellement. L'intervieweur commence par introduire les objectifs et le déroulement de l'entretien. Ensuite, l'intervieweur demande au participant son accord pour passer l'entretien, ainsi que pour l'enregistrement de ses propos. L'entretien commence lorsque l'intervieweur prononce la phrase d'introduction (phrase 1, tableau 13). Pour la moitié des participants, cette phrase concerne des incidents vécus négativement, pour l'autre moitié, cette phrase concerne des incidents vécus positivement. Une fois que le participant évoque avoir une telle situation en tête, l'intervieweur lui demande de rapporter cette situation, de la façon la plus détaillée et factuelle possible (question a), tableau 13). Lorsque nécessaire, l'intervieweur utilise les questions supplémentaires pour compléter le rapport du participant (questions b), c), d), e), tableau 13). Lorsque le rapport de l'incident est terminé, l'intervieweur relance le participant sur d'autres situations éventuelles (question 2, tableau 13). Si le participant indique n'avoir aucun autre incident équivalent à rapporter, l'intervieweur réutilise la phrase d'introduction en utilisant la valence alternative (positive ou négative), et recommence la même procédure. Lorsque le participant indique n'avoir plus aucun incident des deux types à rapporter, l'entretien s'arrête.

7.2.4 Analyse des données

7.2.4.1 Identifier les incidents critiques

Chaque entretien est transcrit verbatim puis divisé en unités d'incident critique. Était considéré comme incident critique toute situation et événements associés pertinents pour nos questions de recherches, et qui rendait clair un contexte, une temporalité et l'éventuelle implication de tiers (voir exemple dans le tableau 14). En tout, 91 incidents critiques ont été identifiés (1,9 incidents par conducteurs, min = 1, max = 4).

Tableau 14, extrait de l'incident 34 par le participant 14 (21 ans, 9 mois de conduite autonome)

« C'était en hiver, en fin de journée [...], il y avait la pancarte « virage dangereux » mais moi je le prenais tous les jours ce virage et pour moi il n'était pas si dangereux. En fait, je n'avais pas remarqué qu'il y avait une plaque de verglas et j'ai seulement compris quand j'ai vu que la voiture elle commençait à tourner. J'ai réussi à me remettre tout droit je ne sais plus comment. Donc en hiver je sais que je conduirai prudemment. Je roulerai moins vite ».

7.2.4.2 Codage des incidents critiques

1.1.1.1.3 Valence positive, négative

Les termes « positifs » et « négatifs » étant volontairement peu précis dans la consigne, leur analyse nécessite donc un critère de catégorisation clair. Pour catégoriser chaque incident, nous nous sommes basés sur les émotions exprimées par les participants, au regard des incidents personnellement vécus. En effet, d'une part, une première lecture des verbatims montre la présence récurrente d'émotions rattachées aux incidents rapportés. D'autre part, les émotions ont été identifiées comme étant un modulateur de l'apprentissage en général (Damasio, 1994; Pavlov, 1927). Ainsi, les incidents sont classés en 2 catégories, en fonction des émotions exprimées par les participants. Les incidents « positifs » renvoient à l'expression des émotions de joie ou de fierté et les incidents « négatifs » renvoient à l'expression des émotions de colère ou de peur.

1.1.1.1.4 Situations, causes et caractéristiques décrites

Les situations sont codées par l'intermédiaire de variables liées au contexte de la situation, au type de danger rencontré et aux facteurs de risques associés. Ces variables ont été élaborées sur la base d'une première analyse du contenu des incidents critique, ainsi que sur la base des variables descriptives communément retrouvées dans la littérature caractérisant les situations accidentelles et presque accidentelles rencontrées par les conducteurs novices (ex. Braitman et al., 2008; Curry et al., 2011; McDonald et al., 2014). Il en résulte les trois variables suivantes.

La variable conditions de conduite (voir tableau 15) décrit l'environnement de l'incident. Il s'agit notamment de qualifier l'infrastructure routière de l'incident (ex... virage, autoroute), le contexte (ex. météo, visibilité, connaissance de la route), le nombre de passagers présent dans le véhicule et le nombre de tiers impliqués.

La variable éléments déclencheurs (voir tableau 16) comprend des catégories visant à décrire précisément l'élément ou l'événement dans la situation qui a déclenché l'incident. Les modalités de cette catégorie comprennent des actions du conducteur, des actions d'autres usagers de la route et l'environnement.

La variable facteurs causaux (voir tableau 16) comprend des catégories caractérisant les éléments perçus par le participant comme ayant causés la situation à risque ou difficile. Le

facteur causal est le facteur explicatif de l'élément déclencheur. Nous distinguons 3 types de facteurs causaux. Les facteurs endogènes désignent les erreurs ou violations du conducteur. Les facteurs internes désignent les difficultés à gérer les états ou traits de personnalités à risque. Les facteurs exogènes désignent les difficultés issues de l'environnement (actions d'autres conducteurs, conditions de conduite dégradées).

Tableau 15, conditions de conduite, avec catégories correspondantes et modalités associées

-
- **Moment de la journée** : Nuit / jour / crépuscule
 - **Météo** : pluie / beau temps / brouillard
 - **Visibilité** : Bonne / mauvaise
 - **Connaissance de la route** : Oui / Non
 - **Passagers** : aucun / un / plusieurs
 - **Configuration routière** : Ligne droite ou autoroute / virage / intersection
 - **Implication d'un autre usager** : Non / un / plusieurs
-

Tableau 16, éléments déclencheurs et facteurs causaux, avec exemples de verbatims et de [modalités associées]

Types de déclencheurs	<ul style="list-style-type: none"> • Action par le conducteur : « Je commençais à m'insérer sur l'autoroute. Je n'ai pas vu le camion arriver. Il m'a klaxonné comme un fou » [<i>Conducteur, coupant la trajectoire d'un autre usager de la route</i>] • Action par un autre usager : « Alors j'étais sur la route et ce camion se rabat sur moi, je pensais qu'il allait m'éjecter hors de la route » [<i>Autre usager, coupe la trajectoire du conducteur</i>] • Configuration dangereuse de l'environnement : « Il y avait de l'eau sur la route, j'ai voulu tourner mais ma voiture a dérapé » [<i>Aquaplaning</i>]
Types de facteurs causaux	<ul style="list-style-type: none"> • Endogène : « Y'avait ce chien au milieu de la route, je l'ai vu qu'au dernier moment » [erreur de reconnaissance] • Interne : « J'étais complètement paniqué. Je n'ai pas l'habitude de faire des démarrages en côte sur des pentes comme ça. Je n'ai pas pu le faire, j'ai tout lâché et ma mère a dû prendre ma place au volant » [panique] • Exogène : « Ce type sortait de son parking et il ne m'a pas vu. Clairement il n'avait pas le droit de me griller la priorité comme ça » [Action d'un autre usager]

1.1.1.1.5 Expériences vécues et apprentissages de compétences de conduite de haut niveau

Ce codage est basé sur l'identification de verbalisations indiquant l'occurrence de « changements » dans le comportement du participant, à la suite de l'expérience d'une situation de conduite perçue comme difficile ou à risque. Ainsi, il s'agit de rechercher de manière systématique des indicateurs tels que « Maintenant je... », ou « Depuis cette situation je... » associés à la mention du comportement signalé comme étant amélioré ou appris. L'identification des compétences de conduite de haut niveau concernées se base sur un schéma de codage élaboré à partir des compétences de conduite identifiées dans le chapitre 3, ainsi que toute autre compétence identifiée sur la base des rapports d'incident par les participants. Les catégories identifiées, leurs modalités et leurs critères de codage sont présentés dans le tableau 17.

Les compétences de perception des situations de conduite ont été divisées en 2 catégories, sur la base des rapports des participants. Une amélioration des compétences d'exploration de la scène visuelle était identifiée lorsque le rapport du participant rendait clair un changement dans les stratégies d'exploration de la scène routière. Les mots clés correspondants comprennent les expressions « je regarde » ou « je vois », associées à un mot

clé d'amélioration tel que « plus » ou « davantage » et un substrat concret comme « mes rétroviseurs », « derrière moi », « les usagers venant de la droite ». Une amélioration des compétences de contrôle des ressources attentionnelles était identifiée lorsque le rapport du participant rendait clair un changement dans les stratégies d'allocation des ressources attentionnelles dans la situation de conduite. Les mots clés correspondants comprennent les expressions « je me concentre » ou « je fais attention », associées à un mot-clé d'amélioration tel que « plus » ou « davantage » et un substrat concret comme « aux motos qui arrivent entre les voies » ou « aux piétons immobiles au bord de la route ».

Une amélioration des compétences de compréhension et de projection était identifiée lorsque le rapport du participant rendait clair un changement dans ses facultés de compréhension et de projection de l'état futur des situations routières. Les mots clés correspondants comprennent les expressions « je comprends » ou « j'anticipe », associées à un mot-clé d'amélioration tel que « plus » ou « davantage » et un substrat concret comme « les comportements des autres conducteurs » ou « les dangers potentiels ».

Une amélioration des compétences de prise de décision tactique était identifiée lorsque le rapport du participant rendait clair un changement dans les comportements ou les stratégies adoptés à l'abord des situations routières. Les mots clés correspondants comprennent les expressions « je ralentis » ou « j'évite », associées à un mot-clé d'amélioration tel que « plus » ou « davantage » et un substrat concret comme « dans les ronds-points » ou « ce type de quartier ».

Une amélioration des compétences de gestion des ressources intra-personnelles était identifiée lorsque le rapport du participant rendait clair un changement dans ses habiletés à gérer son stress, sa fatigue ou dans sa confiance en soi au regard de la conduite. Les mots clés correspondants comprennent les expressions « fatigué », « panique » ou « confiance », associées à un mot-clé d'amélioration tel que « davantage » ou « moins » et un substrat concret comme « dans les parkings », « avant de conduire » ou « lorsque je suis confronté à un imprévu ».

Tableau 17, compétences apprises, avec exemples de verbatims

<p>Types de compétences de conduite de haut niveau apprises</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Compétences d'exploration visuelle de la route : « maintenant, je regarde systématiquement tous mes angles morts » • Allocation des ressources attentionnelles : « [sur autoroutes] maintenant je me concentre vraiment sur les motards qui passe entre les voies » • Compétences de compréhension et de projection : « Maintenant, j'anticipe vraiment mieux les actions des autres conducteurs » • Prise de décision tactique : « [quand il fait froid] Maintenant, je conduis plus lentement quand je vois qu'il peut y avoir du verglas sur la route » • Compétences de gestion des ressources personnelles : « [quand un obstacle se trouve au milieu de la route] maintenant, j'ai moins peur, j'ai appris à ne pas trop dramatiser »
--	--

7.2.4.3 Relations entre situations vécues et compétences apprises ou améliorées (analyse des correspondances multiples)

Les associations entre les catégories ont été explorées à l'aide d'une analyse des correspondances multiples (ACM). L'ACM est une méthode d'analyse géométrique des données permettant de mettre à jour les liens entre plus de deux variables catégorielles (Le Roux & Rouanet, 2010). L'ACM comprend des catégories actives et passives (voir tableau 18). Les

catégories actives construisent les axes. Les variables passives sont situées sur les axes construits par les catégories actives et facilitent leur interprétation.

L'ACM est ici constituée de 5 variables actives, chacune correspondant à un type de compétence de conduite de haut niveau appris par l'expérience d'une situation critique. Puisque plusieurs apprentissages pouvaient avoir lieu lors d'une seule situation, les variables actives ont été recodées sous forme binaire : présence / absence. Les descripteurs de la situation, le type de situations à risque et les facteurs causaux constituaient les variables passives.

Tableau 18, Tableau utilisé pour réaliser l'ACM. Les cases gris clair contiennent les variables actives, les cases gris clair les variables passives

IC	Exploration visuelle	Compréhension - projection	...	Configuration de la route	Type de situation critique	Facteur causal
1	Présent	Absent	...	Ligne droite	Obstacle sur la route	Erreur de reconnaissance
2	Absent	Présent	...	Virage	Conducteur, perte d'adhérence	Perte de contrôle/dérapage
3	Absent	Absent	...	Zone de manœuvre basse Vitesse	Conducteur, calage	Erreur technique
...			...			
91	Présent	Présent	...	Rond-point	Conducteur, dépassement dangereux	Erreur de prise de décision tactique

7.3 Résultats

Nous commençons par une analyse descriptive des variables caractérisant les situations rapportées. Puis, nous analysons leurs relations avec les apprentissages au moyen de l'analyse des correspondances multiples.

7.3.1 Conditions de conduite, conséquences, valence et configuration routière

La grande majorité des incidents a lieu dans de bonnes conditions de conduite : de jour (70%, 64/91), par beau temps (86%, 79/91) et dans de bonnes conditions de visibilité (88% ; 80/91). Plus de la moitié des participants connaissent la route sur laquelle l'incident a lieu (53% : 48/91). Près d'un quart des incidents tout de même ont lieu de nuit (25/91) ou au crépuscule (2/91), et un peu moins d'un sur 10 par temps pluvieux (8%, 7/91).

Les participants sont seuls dans l'habitacle dans la moitié des situations (50% ; 45/91). Un passager est présent dans plus d'un quart des situations (28% ; 26/91). Il y'a au moins deux passagers dans l'habitacle dans une situation sur cinq environ (21% ; 20/91).

La grande majorité des incidents sont non-accidentels (77%, 71/91). Toutefois, les incidents étaient en grande majorité vécus négativement (78%, 71/91). Plus des trois quarts sont ainsi associés à un sentiment d'anxiété (61%, 56/91) ou de colère (16%, 14/91). Un incident sur 10 environ est vécu positivement (9/91). Ils sont notamment associés à des sentiments de joie (5%), de fierté (2/91) ou de soulagement (2/91). Les 15 incidents restant ne sont associés à aucune mention d'émotion dans les verbatims recueillis.

La configuration la plus fréquemment rencontrée est la ligne droite ou autoroute (46%, 42/91), devant le virage (14%, 13/91) et l'intersection (10%, 9/91). Ces trois configurations les plus fréquentes représentent à elles seules 69% des configurations citées. Les configurations moins fréquentes (< 10% des situations) restantes incluent : rond-point (9%, 8/91), insertions (8%, 7/91), feux rouges ou stop (7%, 6/91), zone de manœuvre à basse vitesse (7%, 6/91). Au moins un autre véhicule est impliqué dans l'incident dans environ trois quart des cas (73% ; 66/91). Ce véhicule est seul dans plus la moitié des cas rapporté au total (57%, 52/91), ils sont au moins deux dans un peu plus d'un cas sur 10 (16% ; 15/91).

7.3.2 Éléments déclencheurs et facteurs causaux associés aux situations critiques

L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau 19.

L'élément déclencheur ayant le plus souvent contribué à l'occurrence d'une situation critique est l'action de conduite inadaptée du participant. Ce cas de figure représente un peu moins de la moitié des situations au total (47% ; 43/91). L'élément déclencheur qui arrive ensuite est lié aux conditions environnementales de conduite. Ce cas de figure représente un peu plus d'un quart des situations rapportées (26% ; 24/91). Enfin, le troisième élément le plus rapporté est une action imprévue par un autre usager de la route. Ce cas de figure représente également un quart environ des situations rapportées (25% ; 23/91). Une situation « autre » réfère à un trajet entier d'une vingtaine de kilomètres. Cette situation, perçue comme risquée et difficile, avait cause d'un défaut mécanique du système de frein, dont le conducteur n'avait pas connaissance au début.

La majorité des situations est causée par une erreur des conducteurs novices (48% des situations, 44/91). La majorité de ces erreurs est liée à des défaillances perceptives ou cognitives (42 % ; 38/91). Les erreurs techniques sont très rares (7%, 6/91). Aucune violation n'est rapportée par les participants. Les situations causées par une action d'un autre usager de la route sont les deuxièmes plus fréquentes (43% des situations, 39/91). Les facteurs causaux internes (9% des situations, 9/91) sont les moins souvent rapportés.

7.3.3 Compétences apprises ou développées à la suite de l'expérience d'une situation critique

Dans un peu moins de 9 cas sur 10, les participants rapportent avoir développé des compétences de conduite de haut niveau à la suite de l'expérience de la situation à risque rapportée (84% des situations, 76/91). Cependant dans 15 situations (16%, 15/91), aucun apprentissage n'était mentionné par le participant.

L'analyse des 76 situations associées à de tels apprentissages ou amélioration met en évidence 138 apprentissages ou améliorations différents, soit une moyenne de 1,8 apprentissage par situation rencontrée.

La grande majorité des apprentissages rapportés concerne des **compétences perceptives ou cognitives** (84% des apprentissages rapportés ; 116/138).

Un développement des compétences d'évaluation de la situation est le plus souvent rapporté. Il est composé d'un développement des compétences d'exploration visuelle des scènes routières dans un quart des cas (25% du total des compétences apprises ou améliorées, 35/138). Dans un cas sur cinq, il concerne le développement des compétences d'allocation de l'attention (20% du total des compétences apprises ou améliorées, 27/138). Enfin, 15% des apprentissages rapportés (21/138) concernent le développement des compétences de compréhension et de projection des situations routières.

Un développement des compétences de prise de décision tactique est rapporté dans environ un quart des cas (24% ; 33/138). Ces améliorations concernent des comportements de

ralentissement de la vitesse (18/33), voire d'évitement total (6/33) de la zone perçue comme difficile ou à risque.

Une amélioration ou un apprentissage des **compétences de gestion des ressources intrapersonnelles** est rapporté dans 16% des cas (22/138). Parmi ces améliorations ou apprentissages, plus de la moitié concerne une mise à niveau de la confiance en soi (12/22). Un tiers indique une meilleure gestion de la fatigue ou du stress (6/22). Enfin, quelques changements concernent une meilleure gestion des tendances à la prise de risque (4/22).

Tableau 19, Éléments déclencheurs, facteurs causaux et développements des compétences de conduite de haut niveau rapportés par les conducteurs novices interrogés.

Éléments déclencheurs rapportés		
Catégories	Type	Effectifs
Perte d'adhérence liée aux conditions météo	Environnement	12% - 11/91
Difficulté lors d'une manœuvre à basse vitesse	Conducteur	12% - 11/91
Collision avant-arrière avec un autre usager de la route	Conducteur	11% - 10/91
Coupe la route d'un autre usager	Conducteur	9% - 8/91
Obstacle sur la route	Environnement	9% - 8/91
Violation de priorité	Autre usager	9% - 8/91
Coupe la route du conducteur	Autre usager	8% - 7/91
Route étroite – situation de face à face	Environnement	5% - 5/91
Situation de face à face	Autre usager	4% - 4/91
Dépasse dangereusement le conducteur	Autre usager	4% - 4/91
Grille la priorité d'un autre usager	Conducteur	3% - 3/91
Dépasse dangereusement un autre usager	Conducteur	3% - 3/91

Facteurs causaux rapportés		
Catégories	Type	Effectifs
Erreur de reconnaissance	Endogène	29% - 27/91
Comportement imprévu d'un autre usager	Exogène	24% - 22/91
Perte de contrôle du véhicule	Exogène	13% - 12/91
Défaillance de prise de décision tactique	Endogène	12% - 11/91
Défaillance de gestion des ressources intrapersonnelles	Interne	8% - 7/91
Erreur technique	Endogène	7% - 6/91
Apparition imprévisible d'un obstacle sur la route	Exogène	6% - 5/91

Développements des compétences de conduite de haut niveau rapportés	
Catégories	Effectifs
Compétences d'exploration visuelle de la route	25% - 35/138
Compétences de prise de décision tactique	24% - 33/138
Compétences d'allocation de l'attention (perception active)	20% - 27/138
Compétences de gestion des ressources intrapersonnelles	16% - 22/138
Compétences de compréhension et de projection	15% - 21/138

7.3.4 Relations entre situations critiques vécues, et compétences développées

L'ACM met en évidence cinq dimensions. Les deux premières dimensions sont retenues pour l'interprétation. En effet, la variance représentée par la dimension 3 (16% de la variance totale) est significativement moins importante que la variance représentée par les dimensions 1 (Axe 1, 30,2% de la variance totale) et 2 (Axe 2, 24% de la variance totale). De plus, à partir de la dimension 3, la variance décroît de manière régulière. Les deux axes retenus pour la construction du graphique représentent ainsi 54% de la variance totale.

En concordance avec Le Roux et Rouanet (2010), chaque axe est interprété à l'aide des variables actives contributives et des variables passives remarquables (voir tableau 20 et figure 29). Les critères sont les suivants : une variable active est considérée comme contribuant à l'axe lorsque sa contribution à la construction de l'axe est supérieure à la moyenne des contributions de l'ensemble des variables actives (soit $> 10\%$, 100 divisé par le nombre total de catégories actives : 10). Les variables supplémentaires sont considérées comme notables lorsque l'écart entre deux variables supplémentaires est supérieur à 0,5 point de coordonnées sur un axe précis.

Tableau 20, coordonnées et contribution des variables actives aux deux axes

Axe 1 – auto-évaluation, ressources / perception (30,2% de la variance totale) : Contribution des variables actives et de leurs catégories à l'axe 1 (ctr $> 10\%$), classées en référence à leurs coordonnées sur les colonnes « gauche » (coordonnées négatives), et « droite » (coordonnées positives).		
Apprentissage / amélioration de compétences	Gauche	Droite
Auto-évaluation et gestion des ressources personnelles (22,2%)	1,2	
Allocation de l'attention (22,8%)		1,1
Exploration des situations routières (15%)		0,8
Axe 2 - compréhension-projection/ décision (24%) : Contribution des variables actives et de leurs catégories à l'axe 2 (ctr $> 10\%$), classées en référence à leurs coordonnées sur les colonnes « bas » (coordonnées négatives) et « haut » (coordonnées positives).		
Apprentissage / amélioration de compétences	Haut	Bas
Compréhension et Projection (33,6%)	1,4	
Compétence de prise de décision tactique – non (14,3%)	0,52	
Compétence de prise de décision tactique – oui (26,3%)		0,95

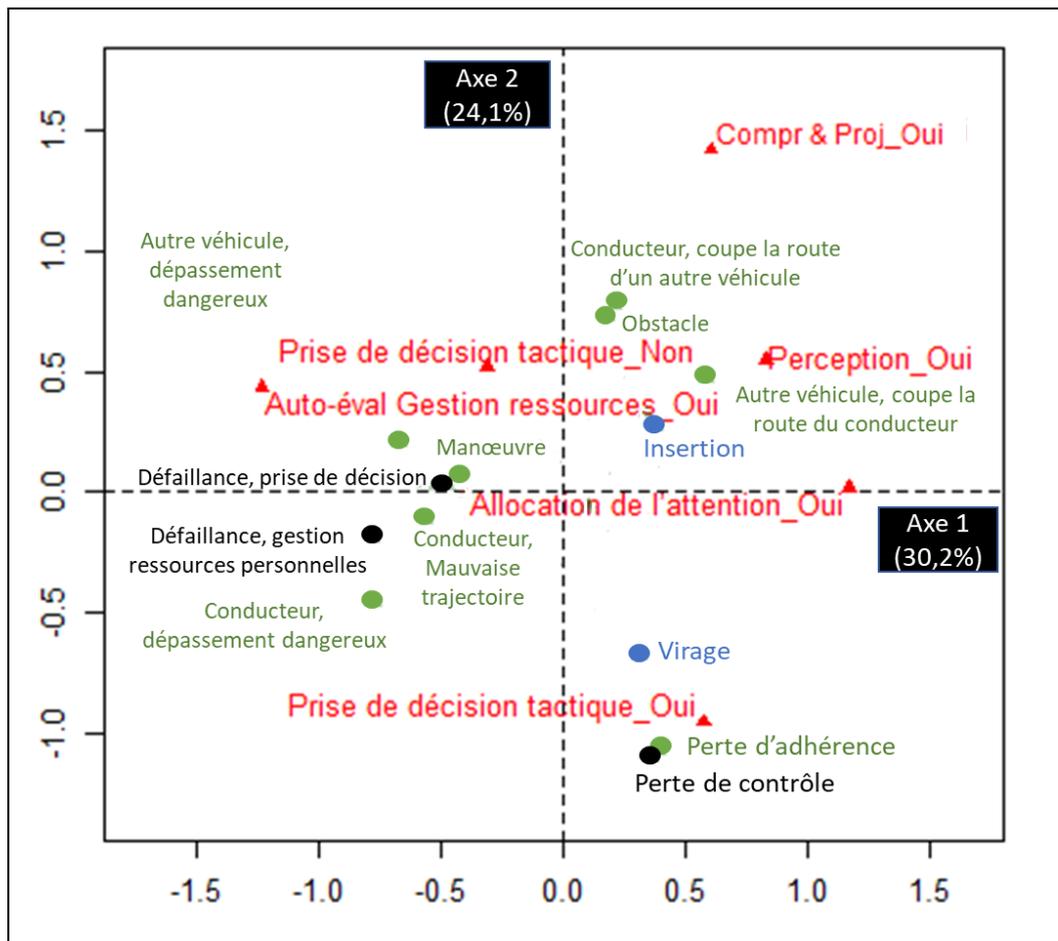


Figure 29, nuage des variables actives des deux axes retenus sur le plan en deux dimensions

7.3.4.1 Axe 1 : auto-évaluation et gestion des ressources personnelles / perception de la situation

Nous interprétons le premier axe (30,2% de la variance totale) comme opposant d'un côté les situations critiques associées au développement des compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles, et de l'autre les situations associées au développement des compétences de perception de la situation de conduite (voir figure 29 ; tableau 20).

En effet, à la gauche de l'axe, les variables actives qui contribuent et leurs catégories ($ctr > 10\%$) sont celles concernant le développement des compétences de gestion des ressources intrapersonnelles ($x = -1,2$). Les variables supplémentaires décrivent deux types de situations : Les situations qui proviennent d'un stress incontrôlé par le conducteur (facteur causal – défaillance, gestion des compétences intrapersonnelle ($x = -0,78$) ; configuration – zone de manœuvre à basse vitesse ($x = -0,47$) ; élément déclencheur – difficulté manœuvre basse vitesse ($x = -0,43$)). Et les situations qui proviennent d'une défaillance des compétences de prise de décision par le conducteur (facteur causal – défaillances, prise de décision ($x = -0,52$) ; élément déclencheur – conducteur, dépasse dangereusement un autre usager ($x = -0,77$) ; élément déclencheur – conducteur, mauvaise déviation de trajectoire ($x = -0,56$)).

Par exemple, l'incident A1 (tableau 21) décrit une situation de manœuvre basse vitesse stressante pour le conducteur. Après l'avoir maîtrisée, le conducteur signale une amélioration de sa confiance. De même, l'incident A2 (tableau 21) décrit une situation causée par une erreur de décision du conducteur, liée à une déviation de trajectoire volontaire en direction d'un autre usager. Il ressent une forte émotion de peur à la suite de cette situation, qui le pousse à diminuer ses comportements à risque dans le futur.

De plus, à la droite de l'axe, les variables qui contribuent et leurs catégories (ctr > 10%) sont celles concernant le développement des compétences d'allocation de l'attention (AA, x = 1,1) et des compétences d'exploration visuelle de la route (EVR, x = 0,8). Les variables supplémentaires décrivent des situations complexes et dynamiques, liée à une erreur de reconnaissance et à une action d'un autre usager (facteur causal – erreur de reconnaissance (x=0,11) ; configuration – Insertion (x = 0,38) ; élément déclencheur – autre usager coupe la route du conducteur (x = 0,58)).

Par exemple, l'incident B (tableau 21), décrit une situation causée par une action imprévue d'un autre usager, qui vient couper la route du conducteur. Cette situation pousse le conducteur à améliorer ses stratégies d'exploration perceptive de la route.

Tableau 21, incidents typiques de la gauche (A1 et A2) et de la droite (B) de l'axe 1 « autoévaluation-ressources / Perception »

<p>A1 : « Je devais me garer en bataille et je sais que je me manque toujours, du coup j'étais hyper stressée. Je sais pas comment, j'ai réussi à me garer parfaitement et j'étais super contente. Maintenant, je suis plus en confiance dans ce genre de situation »</p>
<p>A2 : « Il y avait ce cycliste sur la droite. Du coup, bêtement j'me suis dit que j'allais lui faire peur en faisant semblant de lui foncer dessus. Forcément il a eu hyper peur, mais du coup nous aussi, parce qu'on n'est pas passé loin de sortir de la route. Après bon, j'avais un peu honte. Je prendrais pas un risque aussi stupide maintenant »</p>
<p>B. « Le type sortait du rond-point par la même sortie que j'allais emprunter. Je m'insérais tranquillement et d'un coup il a changé de trajectoire et m'a coupé la route en se remettant sur le rond-point., On s'est presque rentré dedans quoi. Du coup maintenant, je suis très prudent, surtout dans les situations d'insertion. Je regarde à gauche, à droite et mes angles morts. On ne sait jamais ce qu'il peut se passer »</p>

7.3.4.2 Axe 2 : Comprendre et anticiper une situation dynamique / prendre une décision tactique pour éviter une zone à risque

Nous interprétons le premier axe (30,2% de la variance totale) comme opposant d'un côté les situations critiques associées au développement des compétences de projection et de compréhension, et de l'autre les situations associées au développement des compétences de prise de décision tactique (voir figure 29 ; tableau 20).

En effet, en haut de l'axe 2, les variables actives qui contribuent et leurs catégories (ctr > 10%) sont celles concernant les apprentissages ou les améliorations des compétences de compréhension et de projection des situations routières (C&A, y = 1,4) et absence d'apprentissage compétence de prise de décision tactique (y = 0,52). Les variables supplémentaires décrivent des situations complexes et dynamiques, liées à une erreur de reconnaissance, une action erronée de la part du conducteur ou un évènement inattendu issu de l'environnement (facteur causal – erreur de reconnaissance (y = 0,26) ; élément déclencheur – conducteur, coupe la route d'un autre usager (y = 0,77) ; élément déclencheur – obstacle sur la route (y = 0,72)).

Par exemple, l'incident A (tableau 22) décrit une situation accidentelle dans laquelle le conducteur coupe la route d'un autre véhicule sur un rond-point, à cause d'une erreur de reconnaissance. Le conducteur signale alors essayer de mieux anticiper les actions des conducteurs dans ce type de situation.

En bas de l'axe « compréhension-projection/ décision », les variables actives qui contribuent et leurs catégories (ctr > 10%) sont celles concernant les apprentissages ou les améliorations des compétences de prise de décision tactique (x = -0,951). Les variables supplémentaires décrivent des situations de perte de contrôle du véhicule, liées à de mauvaises

conditions de conduite (facteur causal – perte de contrôle du véhicule ($y = -1,1$) ; Configuration – virage ($y = -0,67$) ; élément déclencheur – perte d’adhérence/aquaplaning ($y = -1,06$)).

Par exemple, l’incident B (tableau 22) décrit une situation de perte de contrôle dans un virage, causée par la présence d’une plaque de verglas sur la route. Le conducteur indique prendre des décisions tactiques de ralentissement anticipatoire, lorsqu’il rencontre à nouveau ce type de situation.

Tableau 22, incidents typiques du haut (A) et du bas (B) de l’axe 2 « compréhension-projection/ décision »

A. « J’étais sur la voie de gauche d’un rond-point à deux voies, j’essayais de sortir. J’ai commencé à me rabattre sur la voie de droite et j’ai pas vu l’autre conducteur arriver. Lui non plus ne m’a pas vu assez tôt et on s’est rentré dedans. [...] Depuis, sur les ronds-points, j’essaie d’anticiper où les autres veulent aller. »
B. « C’était l’hiver, j’allais prendre ce virage, et j’ai pas remarqué qu’il y avait une plaque de verglas en plein milieu de la route. Je l’ai compris quand j’ai senti ma voiture glisser et commencer à dérapier [...] Maintenant clairement en hiver, je roule bien plus lentement. »

7.4 Discussion

Cette étude visait à identifier les liens entre les caractéristiques des situations de conduite critiques réellement rencontrées par les novices, et l’apprentissage subséquent des compétences de conduite de haut niveau. Avant d’aborder cette question, nous commençons par discuter nos résultats au regard des caractéristiques des situations difficiles ou à risques classiquement rapportées pour les conducteurs novices. Par ailleurs, la technique des incidents critiques sera validée comme moyen d’investigation pertinent pour l’étude des causes du sur-risque des conducteurs novices, par le biais des situations critiques d’apprentissage.

7.4.1 Des situations causées par des défaillances des compétences de conduite de haut niveau

Nos résultats confirment les conclusions de la littérature concernant l’implication massive des défaillances des compétences perceptives et cognitives, plutôt que des prises de risques délibérées dans le sur-risque des conducteurs novices (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018). En effet, la majorité des situations causées par les conducteurs sont issues d’erreurs de reconnaissance ou de décision, qui impliquent directement les compétences d’évaluation et de prise de décision des conducteurs. De plus, les situations causées par l’environnement impliquent massivement un comportement d’un autre usager, ou l’apparition d’un obstacle sur la route n’ayant pas été anticipés. Un élément incriminant supplémentaire est que les conditions de conduite peuvent difficilement être mises en causes. En effet, la grande majorité des situations a lieu dans de bonnes conditions (jour, bonne visibilité) et sur des configurations routières simples (autoroute ou ligne droite). Par ailleurs, aucun conducteur interrogé ne rapporte avoir commis de violation délibérée des règles du code de la route.

D’autres situations rapportées incluent des pertes de contrôle du véhicule. Ces situations adviennent dans les quelques situations présentant des conditions de conduite dégradées (ex. verglas, pluie). Or, ces pertes de contrôle pourraient avant tout être dues à des défaillances de prise de décision tactique (ex. adaptation de l’allure), plutôt qu’à un manque de maîtrise technique. En effet, les compétences techniques de contrôle du véhicule sont censées être acquises rapidement lors du cursus d’apprentissage (Brehmer, 1994). De plus, certains travaux montrent un effet secondaire d’augmentation de l’accidentalité chez les conducteurs ayant reçu un entraînement à la conduite en condition dégradées (Gregersen, 1996; Katila et al., 1996;

Katila, Keskinen, Hatakka, & Laapotti, 2004). Certains auteurs expliquent ce sur-risque par une hausse de la confiance et une baisse de la prudence des conducteurs entraînés (Assailly, 2013, 2016a). Or, ces effets pourraient se traduire par des prises de décisions tactiques anticipatoires inadaptées de la part des novices, engendrant alors davantage de risques.

Quelques situations critiques recensées dans notre étude sont dues à des défaillances techniques. Cependant, l'ACM indique une proximité entre ces erreurs techniques et une incapacité des conducteurs à s'auto-évaluer et à gérer leurs ressources personnelles. Par conséquent, ces situations pourraient être dues aux effets délétères du stress ressenti lors des premiers mois de conduite autonome. Par exemple, 4 conducteurs indiquent l'occurrence d'une attaque de panique comme cause d'une situation difficile ou à risque. De telles occurrences sont révélatrices de la pression émotionnelle qu'exerce l'activité de conduite sur les conducteurs nouvellement autonome.

7.4.2 Développement des compétences de conduite de haut niveau et liens avec les situations critiques de conduite

La grande majorité des incidents rapportés incluent la mention d'un apprentissage ou d'une amélioration des compétences de conduite de haut niveau. De fait, il semble exister une relation de cause à effet entre l'expérience de situations difficiles ou à risques et le développement de ces compétences, en particulier durant les premiers temps de la conduite autonome. Les résultats de l'ACM suggèrent l'existence de relations entre certaines catégories de situations et certains apprentissages ou améliorations.

7.4.2.1 Apprentissage des compétences d'évaluation de la situation, en lien avec l'expérience de situations dynamiques et complexes

En premier lieu, nos résultats confirment que la conduite est une activité fortement perceptive et cognitive (Gugerty, 2011; Owsley & McGwin, 2010). En effet, plus de la moitié des apprentissages rapportés concernent les compétences d'évaluation de la situation routière. De plus, nos résultats confirment les liens étroits entre ces compétences. Ainsi, leurs apprentissages respectifs se concentrent tous dans le cadran supérieur droit de l'ACM (voir figure 29), autour d'une même classe de situations difficiles ou à risque. Ces situations sont dynamiques, complexes et nécessitent une reconnaissance rapide et précise de leurs développements futurs et potentiels par les conducteurs.

Toutefois, le développement des compétences de perception et des compétences de compréhension et de projection semble être associé à des situations distinctes. Les compétences de compréhension et de projection apparaissent comme développées à la suite de l'expérience de situations critiques causées par une erreur du conducteur lui-même. Par conséquent, ces compétences seraient orientées vers la prévention des risques causés par une erreur du conducteur. Les compétences perceptives sont développées à la suite de l'expérience de situations critiques causées par des actions imprévues d'autres conducteurs. Les compétences perceptives auraient ainsi pour objectif de permettre la réaction rapide et efficace à des événements inattendus dans l'environnement. Elles permettraient en particulier aux conducteurs de récupérer de manière rapide, efficace et orientée les indices pertinents dans la scène routière, en vue d'y éviter un danger émergent (Gugerty, 2011; Leibowitz & Owens, 1977).

7.4.2.2 Prendre des décisions tactiques pour anticiper des situations de danger potentiel facilement identifiables

Nos résultats indiquent un développement des compétences de prises de décisions tactiques anticipatoires (ralentissement, évitement de zones), à la suite d'expériences de perte de contrôle du véhicule dans un virage, notamment en lien avec des conditions de conduite

dégradées (ex. incident B, tableau 22 « c'était l'hiver [...] il y'avait une plaque de verglas »). Il s'agit pour le conducteur d'établir des comportements de minimisation du danger potentiel, soit par un évitement soit par sa diminution mécanique (ex. ralentissement), lors de rencontres de situations similaires dans le futur. Cependant, si un ralentissement peut être une stratégie pertinente de diminution mécanique du danger potentiel, éviter une zone peut avoir un effet délétère à terme sur la sécurité du conducteur. En effet, de telles situations de conduite dégradées ne sont pas toujours évitables. Par conséquent, un comportement évitement peut empêcher la construction des compétences opérationnelles et de haut niveau nécessaire à la négociation future de ce type de situation potentiellement dangereuse.

Paradoxalement, les résultats de l'ACM indiquent que les situations causées par des erreurs de prises de décision (ex. vitesse trop élevée pour la situation) ne sont pas associées à l'apprentissage ou l'amélioration des compétences de prise de décision. Ce résultat est contraire aux résultats observés dans la littérature (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014). Cette différence pourrait être expliquée par notre méthodologie. Dans la littérature, les auteurs se concentrent majoritairement sur des situations accidentelles, où le danger potentiel est identifié par un expert tiers. Dans notre méthodologie, nous incluons également des situations presque accidentelles mais le danger potentiel est identifié par le conducteur lui-même. Or, les conducteurs novices ne sont pas toujours conscient des danger potentiels encourus et provoqués lors de la conduite (Deery, 1999; Higelé et al., 2011). Par conséquent, dans le cadre de cette étude, une « erreur de décision » telle qu'elle aurait été identifiée par des experts, pourrait ne pas avoir été identifiée telle quelle par des conducteurs novices.

7.4.2.3 Développement des compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources intrapersonnelles

Nos résultats suggèrent l'influence délétère du stress et de l'anxiété sur les performances de conduite. Toutefois, ils indiquent aussi leurs bénéfiques en termes de compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles.

Dans la majorité des cas, ces améliorations concernent une régulation de la confiance des conducteurs en leur propres capacité de conduite. Cette régulation peut s'effectuer dans le sens d'une augmentation de cette confiance, lorsque la situation a été bien gérée par le conducteur, alors qu'elle était particulièrement stressante. Par exemple, dans la situation A1 du tableau 21 : « Je devais me garer en bataille et je sais que je me manque toujours, du coup j'étais hyper stressée », la difficulté provient de l'incapacité du conducteur à gérer le stress généré par une auto-évaluation négative de ses capacités. Après sa réussite, il rapporte « j'ai réussi à me garer parfaitement [...] Maintenant, je suis plus en confiance dans ce genre de situation ». Ces résultats sont cohérents avec l'augmentation de la confiance, via un autoévaluation positive à la suite de la maîtrise de nouvelles compétences techniques (Gregersen, 1996; Katila et al., 2004). Un effet inverse peut également se produire, lorsque la situation est issue d'une erreur de décision par exemple la vitesse inadaptée lors de la prise d'un virage. Ces résultats rejoignent l'effet constaté dans la littérature d'une diminution de la surconfiance lors des premiers mois de la conduite autonome constaté (Assailly, 2016b; Deery, 1999).

Nos résultats montrent également que ces situations stressantes améliorent les compétences des conducteurs pour réguler les effets délétères du stress et de la fatigue sur leur conduite et à réguler leurs tendances à la prise de risque. Par exemple, un conducteur interrogé rapporte : « Maintenant, je ne prends plus la route lorsque je suis fatigué comme ça [...], je prends plus de temps, mais je me repose bien avant ». Par exemple dans la situation A2 (Tableau 21) le participant prend une mauvaise décision volontaire qui déclenche le danger potentiel (« bêtement je me suis dit que j'allais lui faire peur en faisant semblant de lui foncer dessus [...] on n'est pas passé loin de sortir de la route. »). Les conséquences émotionnelles de cet incident

sont alors perçues comme étant négatives par le conducteur (« Après bon, j'avais un peu honte. »), qui l'incite à modérer ses tendances à prendre des risques sur la route (« Je ne prendrai pas un risque aussi stupide maintenant »).

Par conséquent, un développement des compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles pourrait survenir selon le processus suivant : d'abord, les conducteurs novices sont confrontés à une situation difficile ou comprenant un danger potentiel. Ces situations peuvent être issues de leur incapacité à s'auto-évaluer (compétences de conduite, confiance, traits de personnalité), de leur incapacité à gérer leurs ressources personnelles (états de fatigue, anxiété) ou de leur incapacité à prendre une décision adaptée à la situation. L'expérience d'une telle situation confronterait le conducteur à ses propres limites. Les conséquences émotionnelles négatives de cette confrontation favoriseraient la remise en question du conducteur. Ce dernier serait poussé à une réflexion concernant ses compétences de conduite, ses états, ou ses traits de personnalité, et leurs effets délétères sur l'efficacité ou la sécurité de la conduite. Les conducteurs seraient alors plus à même d'auto-évaluer et de réguler l'impact de leur état ou de leur personnalité sur leur conduite, et possèderaient un niveau de confiance plus en rapport avec leurs compétences réelles de conduite.

7.4.3 La technique des incidents critiques, une approche pertinente et complémentaire pour étudier le sur-risque des conducteurs

De nombreuses similarités sont constatées entre les caractéristiques des situations rapportées dans l'étude, et les statistiques des situations rapportées dans la littérature. Par exemple, notre étude rapport un ratio nombre accident/nombre de situations critiques (13%) du même ordre que ceux retrouvés dans la littérature (ex. 19% pour Lee, Simons-Morton, Klauer, Ouimet, & Dingus, 2011 ; 16% pour Seacrist et al., 2018). De la même manière, le contexte des situations (configuration simple, plusieurs véhicules impliqués, routes connues) et les types de situations à risques (collision avant-arrière ; conducteur coupant la route d'un autre usager ; violation de priorité ; sortie de route) ainsi que leur distribution sont assez comparables à ceux issues de campagnes d'enquêtes ou de l'analyse de rapports de police (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014). Ces similitudes confortent la technique des incidents critiques comme une approche pertinente pour l'acquisition de données fiables, pour l'étude des facteurs du sur-risque des conducteurs novices.

De plus, cette technique permet aussi l'inclusion des situations presque-accidentelles. Une telle inclusion est pertinente pour l'étude du sur-risque du conducteur novice. D'une part, parce qu'elle permet d'augmenter le nombre de situations à risques recensées, et donc de renforcer la solidité statistique des résultats recueillis (Dingus et al., 2006; Guo, Klauer, Hankey, & Dingus, 2010; Klauer et al., 2006; Seacrist et al., 2018). D'autre part, parce qu'elles permettent d'accéder à davantage de facteurs déterminants des situations à risques, ainsi qu'aux stratégies de résolutions et l'apprentissages résultant de cette expérience (Seacrist et al., 2018; Stefanova, Burkhardt, Wullems, et al., 2015).

Enfin, elle possède l'avantage de s'intéresser aux risques et difficultés perçus par les conducteurs, plutôt qu'aux risques et difficultés réels, classiquement étudiés dans la littérature. Or, chez les novices le risque perçu n'est pas toujours corrélé au risque réel. Ces derniers peuvent évoluer dans des situations objectivement risquées (fortes chances d'accident), sans toutefois s'en rendre compte (Higelé et al., 2011). Ainsi, plusieurs situations objectivement peu risquées mais jugées comme difficiles ont été rapportées par les conducteurs (ex. situation de manœuvre à basse vitesse). Ces situations permettent d'accéder à des mécanismes d'apprentissages encore mal connus à ce jour.

7.5 Conclusion, Limites et perspectives

7.5.1 Limites

Une limite principale découle du mode de rapport des incidents. En effet, les résultats présentés ici proviennent d'auto-rapport, basés sur des rappels d'évènements. Par conséquent, ces rappels peuvent être orientés, incomplets ou éloignés des faits tels qu'ils se sont réellement produits. Par exemple, les conducteurs peuvent avoir volontairement gardés pour eux les situations de violations, considérées comme socialement peu désirables (Krumpal, 2013; Richman, Kiesler, Weisband, & Drasgow, 1999). Nos conducteurs novices peuvent également ne pas se souvenir d'informations cruciales concernant des évènements de conduite ayant menés à un apprentissage, ou démontrer une analyse erronée des tenants et aboutissants de la situation (Higelé et al., 2011).

7.5.2 Conclusion et perspectives

En s'intéressant aux risques et aux difficultés perçus par les novices, nos travaux mettent en évidence des liens forts entre l'expérience de situations critiques et l'apprentissage de compétences de conduite de haut niveau. Cela confirme notre hypothèse de l'existence d'un processus d'apprentissage « sur le tas », lors des premiers temps de la conduite autonome. Un tel processus pourrait être responsable d'une partie de la diminution importante du sur-risque des conducteurs novices, durant cette période.

La majorité des apprentissages concernent les compétences perceptives et cognitives. Ces dernières sont développées via l'expérience de situations dynamiques et complexes. Ce résultat rejoint le constat général de l'implication massive de défaillances de telles compétences dans le sur-risque des conducteurs novices (ex. Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; Seacrist et al., 2018).

Les compétences de compréhension et de projection sont développées par l'expérience de situations causées par une erreur du conducteur lui-même. Les compétences de perception sont développées par l'expérience de situations causées par des actions imprévues d'autres conducteurs et, plus largement, d'autres usagers. Enfin, les compétences de prise de décision tactique anticipatoires sont développées à la suite d'expériences de perte de contrôle du véhicule en conditions dégradées de conduite.

Au regard de nos objectifs initiaux, la seconde étude utilisera ces informations pour construire des situations d'évaluation et de formation des compétences perceptives et cognitives en réalité virtuelle.

8 Étude 2 : Mesurer les compétences perceptives et cognitives de conduite en réalité virtuelle : apports d'indicateurs combinés

Cette étude a été approuvée par le Comité pour les Recherche impliquant la Personne Humaine (CRPH) de l'IFSTTAR (voir annexe).

8.1 Introduction

L'objectif de cette étude est d'identifier, opérationnaliser et valider des indicateurs pour évaluer les compétences perceptives et cognitives de conduite en situation simulée. L'étude se centre sur les compétences de conduite de haut niveau d'anticipation, et s'appuie pour cela sur des situations susceptibles de les solliciter de manière adéquate en réalité virtuelle. Les situations ont été identifiées sur la base de l'étude précédente et de la revue de la littérature.

8.1.1 *Des compétences perceptives et cognitives nécessaires pour anticiper les situations de conduite*

L'étude 1 a mis en évidence un lien entre l'expérience de situations dynamiques, complexes et inattendues, et l'apprentissage des compétences de conduite perceptives et cognitives. Ces situations impliquent fréquemment une interaction difficile avec un autre usager de la route, causée soit par une erreur de la part du conducteur, soit par une action inattendue de la part de cet autre usager. De nombreux conducteurs indiquent avoir développé leurs compétences d'anticipation des dangers à la suite de ces situations. Certains explorent l'environnement à la recherche d'éléments potentiellement dangereux dans la situation quand d'autres indiquent mieux anticiper les agissements des autres conducteurs. Enfin, certains indiquent avoir développé leurs compétences de prise de décision anticipatoires pour diminuer le risque d'une situation potentiellement dangereuse.

Cette implication des compétences d'anticipation pour la maîtrise des situations dynamiques et complexes est retrouvée par de nombreux auteurs (Crundall, 2016; Crundall et al., 2012; Fuller, 2005). Par compétences d'anticipation, nous entendons les compétences de perception, de compréhension, de projection et de prise de décision, nécessaires à la maîtrise et à l'évitement des dangers routiers avant même qu'ils adviennent (Endsley, 1995b; Fuller, 2005; Gugerty, 2011; Klein, 2008).

La perception anticipatoire des éléments dans l'environnement est dite « active » et a trait aux explorations guidées, basées sur la vision focale et ayant pour objectif la recherche active d'éléments d'intérêt dans l'environnement routier (ex. Chapman & Underwood, 1998; Crundall et al., 2012). Elle est soutenue par la perception passive, automatique et inconsciente, qui permet la surveillance continue de l'environnement ainsi que les tâches élémentaires de guidage du véhicule (Leibowitz & Owens, 1977). Cette dernière est soutenue par la vision périphérique et le phénomène de capture attentionnelle (Yantis & Jonides, 1984). La perception permet la compréhension de la situation, qui concerne l'analyse des éléments perçus pour leur donner un sens. Elle sert de base à la projection concernant l'état futur de la situation. Sur la base de cette projection, le conducteur peut alors prendre une décision, de façon à anticiper un danger dans une situation.

La prise de décision anticipatoire peut être de deux types : tactique ou opérationnelle (Fuller, 2005; M. Green, 2000). La prise de décision anticipatoire tactique a pour objectif de permettre au conducteur d'agir en prévention de changements potentiels dans la situation, ou de préparer à l'avance une manœuvre de navigation (Fuller, 1984, 2005; Tanida & Pöppel, 2006). Il s'agit généralement d'un ralentissement de l'allure en prévision d'une situation dangereuse (Crundall et al., 2010, 2012; Wang et al., 2010). La prise de décision anticipatoire opérationnelle peut se traduire par des temps de réaction au freinage plus court lors de

l'apparition brutale d'un danger attendu, en comparaison d'un danger imprévisible (M. Green, 2000).

8.1.2 Deux situations qui mobilisent de façon différenciée les compétences d'anticipation des conducteurs

Deux types de situations ont été identifiées dans la littérature comme mobilisant spécifiquement les compétences d'anticipation. Ces deux types de situations diffèrent quant à leurs traits de structure (Holyoak & Koh, 1987). Les traits de structure désignent les caractéristiques de la situation qui déterminent le danger à neutraliser dans la situation.

Dans les situations couvertes, un danger potentiel est caché par un élément de l'environnement. Il s'agit par exemple d'une situation dans laquelle un camion bloque la vue sur un passage piéton. Dans une telle situation, le conducteur doit d'abord repérer le camion et le passage piéton, et identifier qu'il peut potentiellement cacher un danger. Sur la base de cette analyse, le conducteur doit intensifier son exploration de la zone avant gauche du camion pour favoriser la détection rapide du danger, et se préparer à une manœuvre d'urgence, telle qu'un freinage, si le danger advient effectivement. La littérature identifie deux types de situations couvertes, qui se distinguent quant à leurs traits de surface : les caractéristiques de la situation qui ne modifient pas le type de danger à neutraliser (Crundall et al., 2012; Pradhan et al., 2005). Ces situations diffèrent sur la nature de l'objet qui cache le danger potentiel. On trouve celles dans lesquelles ce dernier est caché par un objet ou un élément mobile ou potentiellement mobile (ex. camion, bus) ; et celles dans lesquelles le danger est caché par un élément fixe de l'environnement (ex. haie). A notre connaissance, les différences entre ces situations n'ont pas été investiguées.

Dans les situations ouvertes, le danger potentiel peut être détecté longtemps en amont par le conducteur. C'est le comportement de cet élément qui détermine l'occurrence du danger. Dans une telle situation la perception servira à la surveillance active et continue du comportement de l'élément potentiellement dangereux. Sur la base de cette perception, le conducteur devra comprendre les intentions de l'individu. Il pourra projeter son comportement dans un futur proche et prendre une décision adéquate pour l'anticiper si celui-ci devait présenter un risque (Crundall et al., 2012; Yeung & Wong, 2015). La littérature identifie deux types de situations ouvertes, qui se distinguent également sur leurs traits de surface : les situations où le danger est visible mais statique jusqu'à l'arrivée du conducteur ; et les situations où le danger est visible mais mouvant. Des travaux montrent que les conducteurs novices peinent particulièrement à anticiper les intentions des autres conducteurs parmi lesquels ils évoluent (Mundutéguy & Darses, 2007; Mundutéguy & Ragot-Court, 2011; Sagberg & Bjørnskau, 2006).

Par contraste, certaines situations, caractérisées comme des situations d'intrusion, ne permettent pas au conducteur d'anticiper le danger (M. Green, 2000). Ces situations impliquent un danger d'apparition brutal, ne pouvant raisonnablement pas être prévu par le conducteur. Par exemple, Wang et al. (2010) proposent l'apparition brutale de barils sur la route, en provenance d'une localisation invisible au conducteur. Ces situations permettent de mesurer un temps de réaction à l'arrivée d'un danger, sans possibilité préalable d'évaluation et de prise de décision anticipatoire.

8.1.3 Des indicateurs actuels qui ne permettent pas toujours de mesurer les compétences d'anticipation des conducteurs

En situation expérimentale, les compétences perceptives et cognitives sont mesurées via l'utilisation d'indicateurs oculomoteurs et de variations d'allure. Les indicateurs oculomoteurs sont basés sur l'analyse des fixations (Salvucci & Goldberg, 2000). Ils comprennent les temps

de détection des éléments d'intérêt dans l'environnement après leur apparition, ainsi que le temps passé à explorer ces éléments d'intérêt (Crundall et al., 2012; Pradhan et al., 2005). Les indicateurs basés sur les variations d'allure comprennent les temps de réaction au freinage après l'apparition d'un danger (M. Green, 2000), ainsi que les ralentissements avant l'arrivée au lieu du danger potentiel (Crundall et al., 2010, 2012; Wang et al., 2010). D'autres indicateurs, comme le « plus faible TTC » (*time to collision*) recensé sur l'intégralité d'une situation de conduite contenant un danger, permettent d'estimer les conséquences de la situation en terme de collision (Kusano et al., 2015; Stahl et al., 2014).

Une approche courante repose sur l'analyse des différences de performances entre conducteurs expérimentés et novices lors de situations contenant un danger (Crundall et al., 2012; N. Kinnear et al., 2013; Pradhan et al., 2005). Dans ce cadre, les indicateurs basés sur les variations d'allure peuvent être efficaces pour évaluer les compétences d'anticipation, à condition de comparer deux groupes possédant la même expérience de conduite (Crundall et al., 2010; Wang et al., 2010). D'autres, comme les indicateurs oculométriques, ne permettent pas toujours de discriminer les conducteurs en fonction de leur expérience (voir par exemple Crundall, Chapman, Phelps, & Underwood, 2003; Crundall et al., 2012; Stahl, Donmez, & Jamieson, 2014; Yeung & Wong, 2015). Par exemple, dans le cadre de situations couvertes, Crundall et al., (2012) ne parviennent pas à discriminer conducteurs expérimentés et novices concernant leurs comportements oculomoteurs de recherche active du danger. Pourtant, les expérimentés détectent plus rapidement les dangers dans ces situations, en comparaison des novices. Enfin, certains, comme les temps de réaction aux freinages, n'ont à notre connaissance jamais été utilisés pour évaluer spécifiquement les compétences d'anticipation des conducteurs. Pourtant, dans une revue, Green (2000) identifie un effet de l'anticipation sur les temps de réaction au freinage. En effet, il constate que les temps de réaction au freinage les plus longs ont lieu dans les situations d'intrusion, alors que les plus courts ont lieu lorsque le danger était « attendu ».

8.1.4 Apports potentiels d'indicateurs combinés pour la mesure des compétences d'anticipation

Aucune étude à notre connaissance n'utilise une approche basée sur une combinaison d'indicateurs pour mesurer les compétences. Nous proposons ici une telle approche en associant des indicateurs simples (ex. détection du danger, temps de réaction au freinage) pour obtenir un indicateur composite (ex. temps de réaction au freinage, après la détection du danger). Un indicateur composite permettrait l'accès aux étapes intermédiaires entre la perception du danger et l'action dans la situation.

En effet, la conduite est une activité visuelle aussi bien que motrice, et les modèles de la prise de décision indiquent invariablement une étape d'évaluation de la situation précédant l'action dans la situation (Endsley, 1995b; Flin et al., 2008; Gugerty, 2011; Jeong et al., 2006; Klein, 1993, 2008; Owsley & McGwin, 2010; Walter et al., 2001). Par conséquent, de meilleures compétences d'anticipation opérationnelle pourraient se traduire par des délais plus courts entre la détection du danger – ou d'un indice préfigurant d'un danger – et la première action réalisée pour minimiser le risque (M. Green, 2000). Dans ce cadre, un premier indicateur combiné pourrait être le délai séparant la première fixation sur le danger du premier freinage subséquent. Utilisé en situation couverte, il pourrait identifier un amorçage d'une action de freinage, en prévision de l'apparition brutale d'un danger potentiel anticipé.

Un second indicateur combiné permettrait d'identifier les comportements de recherche active anticipatoire du danger, usuellement difficile à mesurer (Crundall et al., 2012; Pradhan et al., 2005). Il s'agit du délai séparant la dernière fixation sur un élément cachant le danger (ex. dernier regard sur le camion) de la première fixation sur le danger (ex. premier regard sur le

piéton). En effet, si ce délai est court, cela pourrait signifier que le conducteur démontre un comportement de recherche du danger, en explorant activement l'élément de l'environnement susceptible de dissimuler le danger (ex. le conducteur explore le coin arrière gauche du camion, pour pouvoir détecter le plus vite possible l'apparition d'un piéton).

Une étape supplémentaire de notre approche consiste à comparer les indicateurs recueillis lors des situations ouvertes et couvertes (anticipable), à ceux recueillis sur des situations contrôles d'intrusion (non anticipable). Prenons l'exemple de l'indicateur de délai fixation-freinage décrit ci-dessus. Si le délai est plus court dans le cadre d'une situation couverte que dans une situation d'intrusion, alors cet indicateur évalue la mise œuvre de compétences d'anticipation du conducteur dans la situation couverte. A notre connaissance, une telle approche comparative n'a encore pas été réalisée pour l'évaluation des compétences d'anticipation.

8.1.5 Hypothèses

En accord avec la littérature, nous attendons de meilleures performances des conducteurs expérimentés concernant les indicateurs des compétences d'anticipation dans les situations ouvertes et couvertes. Au contraire, nous n'attendons aucune différence entre expérimentés et novices sur les situations d'intrusion. Ainsi, dans le cas où un indicateur s'avèrerait discriminant entre conducteurs novices et conducteur expérimentés dans une situation de conduite, nous pourrions en conclure sa pertinence pour l'évaluation des compétences de conduite perceptives et cognitive.

Pour évaluer les compétences de prise de décision anticipatoire tactique, nous attendons des ralentissements anticipatoires plus précoces de la part des conducteurs expérimentés en situation ouverte et couverte. Par ailleurs, nous attendons des ralentissements plus précoces sur les situations couvertes et ouvertes, en comparaison des situations d'intrusion.

Pour évaluer les compétences de recherche active du danger, nous attendons une détection plus rapide et une exploration plus longue de l'indice préfigurant de l'apparition du danger pour les conducteurs expérimentés, en comparaison des novices. Sur l'indicateur combiné de recherche active du danger, nous attendons des délais plus courts entre le dernier regard sur le précurseur et le premier regard sur le danger pour les conducteurs expérimentés. Par conséquent, nous attendons également un temps de détection du danger plus court chez les conducteurs expérimentés.

Pour évaluer les compétences de prise de décision anticipatoire opérationnelle, nous attendons un délai plus court pour les expérimentés sur l'indicateur combiné de délai entre le premier regard sur le danger et le premier freinage subséquent. Nous attendons par conséquent moins de collisions pour cette catégorie de conducteur.

8.2 Matériel et méthode

8.2.1 Plan expérimental

Un premier facteur est l'expérience du conducteur. Il divise les participants en deux catégories en fonction de leur expérience de conduite (catégorie des conducteurs : expérimentés/novices → E2). Deux critères sont utilisés pour catégoriser les conducteurs : le temps écoulé et le nombre de kilomètres auto-déclaré depuis l'obtention du permis. En effet, le seul temps passé depuis l'obtention du permis de conduire n'est pas automatiquement représentatif de l'expérience de conduite. Or, des conducteurs ayant obtenu le permis depuis peu de temps peuvent conduire de manière très régulière et rencontrer une grande diversité de situations. De même, des conducteurs ayant obtenus le permis depuis longtemps peuvent avoir très peu conduit depuis le passage de l'examen. Ainsi, les conducteurs étaient qualifiés de

novices lorsqu'ils possédaient le permis depuis moins de deux ans, ou qu'ils déclaraient avoir conduit moins de 5000km depuis l'obtention du permis (Mayhew, Simpson, & Pak, 2003; McCartt et al., 2003). Les conducteurs étaient qualifiés d'expérimentés lorsqu'ils dépassaient simultanément ces deux critères. Pour isoler autant que possible les effets du facteur expérience de conduite, et limiter les effets du facteur âge, le recrutement n'incluait que des conducteurs âgés de moins de 30 ans (N. Kinnear et al., 2013).

Un second facteur est la compétence d'anticipation sollicitée. Les conducteurs conduisent sur trois types de situations de conduite test. En modulant sa configuration et le type de danger potentiel qu'elle contient, chacune de ces situations mobilise différemment les compétences d'anticipation. Les situations couvertes sollicitent les compétences d'anticipation lorsqu'un danger n'est pas visible. Les situations ouvertes sollicitent les compétences d'anticipation lorsque le danger est visible en amont, mais que l'évolution de son comportement est susceptible de déclencher un danger. Les situations d'intrusion sont des situations contrôlées car elles ne sollicitent pas les compétences d'anticipation (type de compétence sollicitée/situation à risque : couverte ; ouverte ; Intrusion → Si3).

Tous les participants rencontrent toutes les situations test une seule fois. Les situations test sont réparties sur 3 circuits virtuels. L'ordre de passage sur les 3 circuits tests est contrebalancé entre les participants selon 3 ordres, en suivant la méthode du carré latin (voir tableau 23).

Tableau 23, ordre de passage des circuits contrebalancé entre les participants

Ordre 1	Ordre 2	Ordre 3
Circuit 1	Circuit 2	Circuit 3
Circuit 2	Circuit 3	Circuit 1
Circuit 3	Circuit 1	Circuit 2

8.2.2 Participants

Quarante-neufs conducteurs ont participé à l'étude (16 hommes, 33 femmes, âge moyen = 23 ans, ETY = 2,5 ans ; voir tableau 24 pour le détail). Ils étaient rémunérés 30 euros pour leur participation. Sur les 49 participants, 5 n'ont pu prendre part à l'expérimentation pour cause de mal du simulateur (dont 5 femmes). Les 44 participants ont été repartis en un groupe de 20 conducteurs et un groupe de 24 conducteurs expérimentés. Les conducteurs expérimentés étaient âgés de 3 ans de plus que les conducteurs novices en moyenne ($p < 0.01$). Cependant, leur âge médian ne différait que d'un an. Les conducteurs expérimentés possédaient le permis en moyenne depuis 35 mois de plus que les conducteurs novices ($p < 0,001$). Cette différence se traduit par une moyenne de 52000 kilomètres effectués en plus par les conducteurs expérimentés ($p < 0,001$). Par ailleurs, on ne peut pas conclure à une différence en termes d'exposition à la conduite accompagnée entre les deux groupes de conducteurs (expérimentés : 54% ont fait la conduite accompagnée ; novices : 45% - $p = 0.28$).

Tableau 24, distribution et caractéristiques de l'échantillon de conducteurs recruté. L'âge est exprimé en années, le temps depuis l'obtention du permis (tps), en mois.

	Expérimentés (n = 24)			Novices (n = 20)			Différences (Exp - Nov)		
	Age	Tps	Km	Age	Tps	Km	Age	Tps	Km
Moyenne	21	58	56k	24	23	4000	+3	+35	+52k
Médiane	22	53	37k	23	17	2500	+1	+36	+34,5k
ETY	5	25	52k	2	21	5700			
Min	19	29	10k	21	3	200			
Max	27	132	200k	28	27	20k			

8.2.3 Matériel

8.2.3.1 Simulateur et matériel de mesure

Nous utilisons un simulateur pleine échelle à base fixe utilisant une cabine de Peugeot 206 (simulateur moyenne fidélité, voir figure 30). La scène de conduite est projetée sur 6 panneaux de 2X3m et propose ainsi 220° d'exploration visuelle possible sur la situation de conduite, en plus de la vue arrière.

Les données concernant les mouvements oculaires sont récupérées via un oculomètre Pertech – EyeTechSensor, à une fréquence d'enregistrement de 50 Hz. Elles sont ensuite analysées image par image grâce au logiciel EyeTechPilot fourni avec l'oculomètre.

Les données concernant le comportement des conducteurs (freinage, vitesse) sont récupérées via le logiciel du simulateur. Les variations de vitesse sont récupérées via la mesure de la vitesse instantanée. Les freinages sont récupérés via les données issues du pédalier (appuis sur la pédale de frein). Une caméra infrarouge venait compléter ces données en récupérant les mouvements des pieds des participants. Par manque de temps, ces données n'ont cependant pu être exploitées.

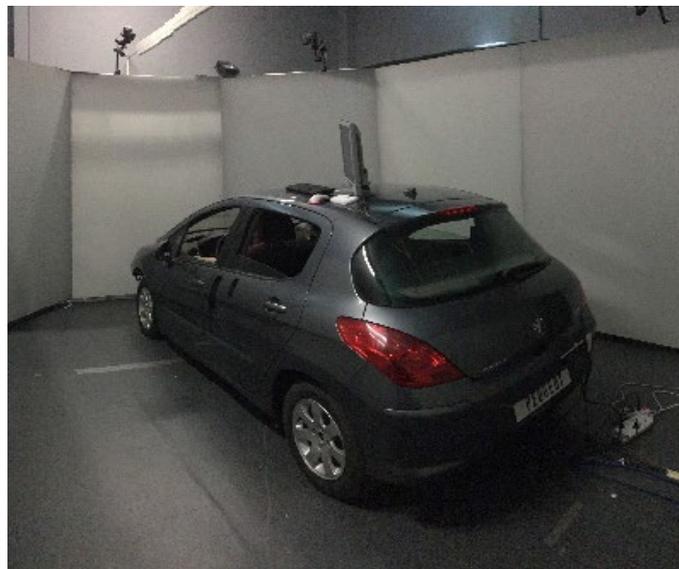


Figure 30, Simulateur pleine échelle IFSTTAR - Satory

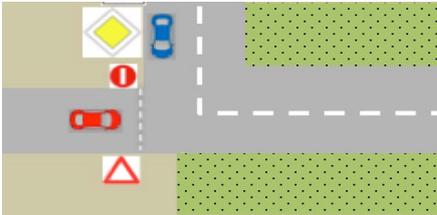
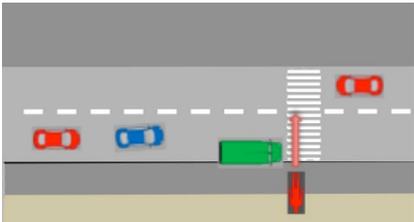
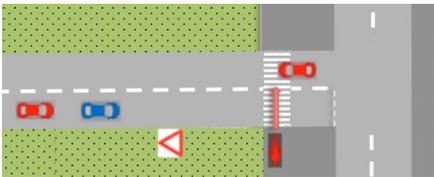
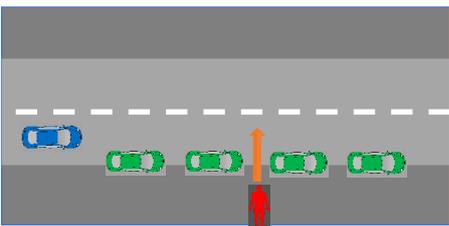
8.2.3.2 Circuits expérimentaux et situations test

Un circuit d'entraînement et trois circuits expérimentaux ont été conçus pour l'expérimentation. Le circuit d'entraînement comprend toutes les configurations routières présentes sur tous les circuits expérimentaux, mais aucune situation test. Le temps de parcours du circuit d'entraînement est d'environ 6 à 7 minutes.

Chacun des trois circuits expérimentaux n'est complété qu'une seule fois par chaque participant. Le temps de parcours d'un circuit expérimental est d'environ 10 minutes, pour une longueur totale d'environ 6 à 7 km. Chaque type de situation test contenant un danger (couvert, ouvert, intrusion) n'est présent qu'une seule fois par circuit expérimental. Pour des raisons de conception technique, un circuit expérimental comprend à la fois la situation d'intrusion contrôlée et une situation de test. Il s'agit d'une situation couverte (camion) qui est néanmoins séparée de la situation d'intrusion par plusieurs minutes, de façon à minimiser un effet d'hyper vigilance. Chaque participant rencontre les situations test une seule fois. Pour limiter les effets psychologiques négatifs d'une collision éventuelle, le véhicule des participants

traverse le danger sans qu'aucun son ne vienne signaler une collision. Quatre situations tests sont retenus pour l'expérimentation (voir tableau 25).

Tableau 25, situations tests retenus pour l'expérimentation.

Nom de la situation test	Description	Indicateurs des compétences d'anticipation
<p>Situation ouverte</p> 	<p>Un autre usager (en rouge à gauche) viole un cédez le passage et coupe la route du conducteur.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Indice du danger : un autre véhicule arrive à une vitesse élevée sur la voie adjacente droite • Danger : l'autre véhicule refuse la priorité 	<p>Perception :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Surveillance du danger potentiel (autre véhicule) <p>Prise de décision :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ralentissement de la vitesse à l'approche du lieu du danger potentiel (cédez le passage)
Situations couvertes		
<p>Situation couverte 1</p> 	<p>La vision de la partie droite du passage piéton est cachée par la présence d'un camion garé sur le côté. Un piéton traverse la route soudainement et vient couper la trajectoire du conducteur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Indice du danger : Camion cachant le passage piéton • Danger : piéton qui traverse 	<p>Perception :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Surveillance du lieu du danger potentiel (camion/haie), avant l'apparition du danger (piéton) • Détection du danger (piéton) après son apparition <p>Prise de décision :</p>
<p>Situation couverte 2</p> 	<p>La vision de la partie droite du passage piéton est cachée par une haie. Un piéton traverse la route soudainement et vient couper la trajectoire du conducteur.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Indice du danger : Haie cachant le trottoir de droite • Danger : piéton qui traverse 	<ul style="list-style-type: none"> • Ralentissement de la vitesse à l'approche du lieu du danger potentiel (camion/haie) • Freinage après l'apparition du danger (piéton) • Temps entre la détection du danger (piéton) et le freinage
<p>Situation d'intrusion</p> 	<p>Un piéton (en rouge en bas) apparaît sur le trottoir de droite et amorce directement une traversé.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Danger : piéton sur la route 	<p>Comportements contrôlés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perception : détection du danger (piéton) après son apparition • Prise de décision : freinage après l'apparition du piéton

Une situation test ouverte était proposée aux conducteurs. Dans cette situation, un autre véhicule apparaît sur une voie adjacente au conducteur. Cet autre véhicule se dirige progressivement vers un cédez le passage. Il refuse la priorité au conducteur et lui coupe la route. Le danger potentiel est visible pendant une moyenne de 6,5 secondes (ETY = 0,7s) avant d'être réellement dangereux. Dans les premiers temps de la situation, le conducteur doit volontairement lever les yeux de la route et tourner la tête, pour surveiller le comportement de l'autre véhicule, nettement excentré sur la voie adjacente. A mesure que les deux voies se

rapprochent, le conducteur est capable de surveiller le conducteur plus facilement, mais doit se préparer à ce que ce dernier commette une violation en ne lui cédant pas la priorité.

Deux situations tests couvertes étaient proposées aux conducteurs. Ces deux situations permettent d'identifier l'influence de la configuration routière sur les compétences d'anticipation d'un danger potentiel non visible. Dans la situation « camion », un élément potentiellement mobile cache le début d'un passage piéton. Dans la situation « haie », un élément statique cache un trottoir menant à un passage piéton. Dans les deux cas, le danger est constitué d'un piéton qui traverse la route brutalement, à l'approche du conducteur. Ce piéton est visible alors qu'il apparaît directement sur la route, et est donc immédiatement un danger. Pour l'éviter, le conducteur doit donc l'avoir anticipé.

Dans la situation d'intrusion, un piéton apparaît subitement sur le trottoir de droite pour engager directement une traversée de la route, sans qu'un indice dans l'environnement ne permette de l'anticiper. Ce dernier est ainsi visible seulement une seconde avant d'être directement sur le chemin du conducteur. Une telle configuration a été choisie pour permettre au conducteur de l'éviter par une manœuvre d'urgence. En effet, nous avons choisi pour des raisons éthiques de ne pas mettre les participants en situation d'échec forcé, pouvant causer le décès (virtuel) d'un autre individu.

8.2.3.3 Questionnaire d'inclusion et questionnaire de renseignement démographiques et d'habitude de conduite

Le questionnaire d'inclusion comprend des questions liées à l'âge et à la date d'obtention du permis de conduire (voir annexes). Les potentiels participants ayant plus de 30 ans ne sont pas retenus. La date d'obtention du permis de conduire sert à orienter le recrutement pour obtenir deux groupes de conducteurs (novices/expérimentés) suffisamment étoffés pour les analyses. Il comprend également une version informatisée du *Simulation Sickness Questionnaire* qui permet d'écarter les participants susceptibles de présenter un mal du simulateur. Si les participants ont des scores de malaise général ou de nausée/vomissement supérieur à la note de 1 (rien à signaler), ils ne sont pas admis à passer à l'étape suivante de l'étude.

Les participants sélectionnés passent un second questionnaire comprenant des questions de renseignements sociodémographiques et sur leurs habitudes de conduite (voir annexes). Les renseignements sociodémographiques comprennent l'âge, le lieu de résidence (urbain, péri-urbain, campagne) et la catégorie socio-professionnelle. Les renseignements d'habitude de conduite comprennent l'activité de conduite (date d'obtention du permis, pratique de la conduite accompagnée) et l'évaluation du kilométrage moyen effectué par semaine, par mois et par an. Ces renseignements servent à catégoriser les individus en tant que conducteurs expérimentés ou novices. Ce questionnaire incluait aussi une version validée en français du Driver Behavior Questionnaire (DBQ, Guého, Granié, & Abric, 2014), dont les résultats n'ont pu être traités par manque de temps.

La présélection des participants s'est faite en ligne. Les candidats retenus sont ensuite invités à venir sur le site IFSTTAR de Satory (78) pour réaliser l'expérience.

8.2.4 Procédure

A leur arrivée, les participants sont informés du contenu et du déroulement de l'expérimentation, ainsi que des consignes de sécurité inhérentes à la conduite sur simulateur. Puis, ils signent un formulaire de consentement (voir annexes) avant de remplir le questionnaire de renseignement démographique et d'habitude de conduite. Ils effectuent ensuite le circuit d'entraînement de manière à s'accoutumer aux spécificités de la conduite sur simulateur. A l'occasion de ce circuit d'entraînement, le matériel de mesure oculométrique est calibré et réglé.

Puis, la phase test de l'expérimentation commence. Avant le départ pour le premier circuit, le participant reçoit comme consigne de suivre les directions indiquées par un guide vocal, le faisant ainsi passer par chaque situation test du circuit. De manière à limiter le mal du simulateur, la simulation est interrompue quelques minutes entre chaque circuit. S'il le souhaite, le participant peut sortir de l'habitacle pour marcher un peu.

8.2.5 Données recueillies

Le détail des indicateurs utilisés dans chaque situation, accompagné de la méthode de calcul et des compétences évaluées correspondantes, sont disponibles dans les tableaux 26 et 27. L'approche et les arguments pour le choix des indicateurs sont discutés à la suite.

8.2.5.1 Fenêtre d'observation des données

L'analyse des indicateurs oculométriques et de freinages (pédalier) commence lorsque l'indice du danger, qui peut être l'élément qui cache le danger (situations couvertes) ou le danger potentiel (situation ouverte) peut être perçu par le conducteur (voir figure 31 : Indice). Une situation s'arrête lorsque le conducteur dépasse le lieu du danger, ou que ce dernier disparaît de son champ de vision (voir figure 31 : Fin). Dans les situations couvertes, la situation de conduite est ponctuée du moment où le danger est visible pour la première fois (voir figure 31 : Danger).

Le temps séparant l'apparition de l'indice du danger et l'apparition du danger constitue la « fenêtre indice » durant laquelle sont mesurés les compétences de recherche active et de prise de décision anticipatoire. Le temps entre l'apparition du danger et la fin du scénario constitue la « fenêtre danger ». Il permet de mesurer les compétences d'anticipation opérationnelle.

Pour déterminer le commencement des situations couvertes, qui comprennent un indice du danger immobile (camion/haie), un repère fixe dans l'environnement est choisi par les expérimentateurs. Afin de permettre la comparaison inter-situations, ce repère se situe à la même distance du lieu d'apparition du danger dans les deux situations couvertes (30 mètres).

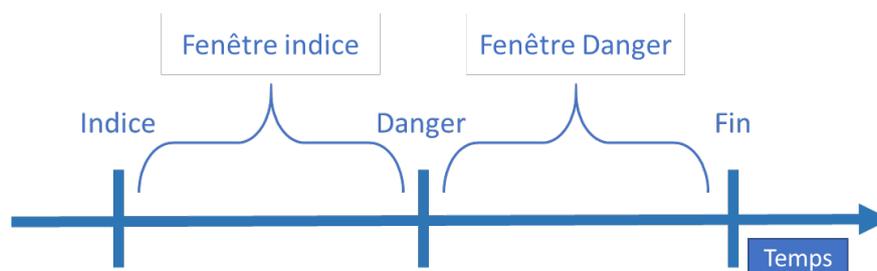


Figure 31, fenêtre temporelle d'observation des données oculométriques et de freinages (pédalier)

L'analyse des variations de vitesse est effectuée sur une fenêtre de 10 secondes, qui encadre le moment où le danger apparaît (voir figure 32). Les données de vitesse étant enregistrées de manière continue (50Hz), une discrétisation est effectuée pour faciliter les analyses (Crundall et al., 2012). Cette dernière consiste à calculer la vitesse moyenne par phase d'une seconde, pour un total de 10 phases. Cette approche permet de compléter l'analyse des indicateurs en permettant l'identification de comportement de ralentissement anticipatoire non issus de freinage mais de relâchement de la pédale d'accélérateur par exemple (Crundall et al., 2010, 2012; Wang et al., 2010).

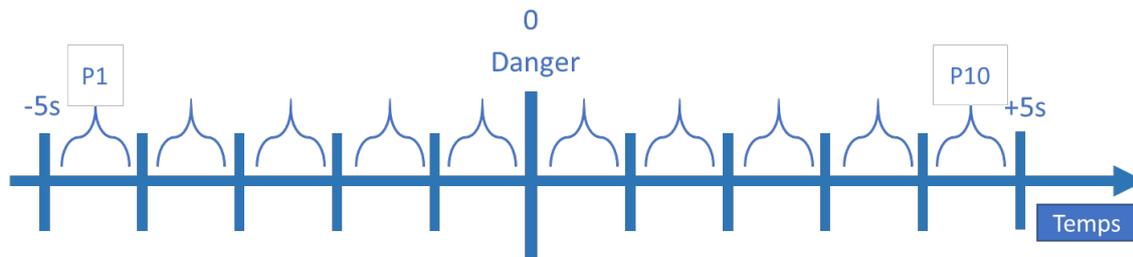


Figure 32, fenêtre temporelle d'observation des données de variations de vitesse

8.2.5.2 Indicateurs oculomoteurs et de freinages

Durant la fenêtre « indice », nous mesurons la vitesse de détection et la durée d'exploration visuelle de l'indice. Durant la fenêtre danger nous mesurons la vitesse de détection du danger, le temps de réaction au freinage et le temps de réaction au freinage après avoir détecté le danger (comportement d'amorçage). Les compétences de recherche active du danger sont mesurées à l'interface des deux fenêtres. Les méthodes de calcul précises de ces indicateurs sont détaillées dans les tableaux 26 et 27.

Les caractéristiques des indicateurs oculomoteurs sont identifiées lors d'un codage manuel réalisé à l'aide de fichiers vidéo. Le codage suit la procédure suivante. Un premier expérimentateur effectue un premier codage. Ce premier codage est vérifié un second expérimentateur. En cas de désaccord à ce moment-là, les trois expérimentateurs se réunissent et décident en concertation, du codage approprié. Enfin, le troisième expérimentateur revérifie l'ensemble des données. Les indicateurs oculométriques sont identifiés sur la base des fixations oculaires. Une fixation est codée lorsque le participant regarde un même endroit de la scène routière pendant un temps égal ou supérieur à 100ms (Crundall et al., 2003, 2002; Salvucci & Goldberg, 2000). Un cas spécifique est à noter concernant la situation ouverte, l'autre véhicule est dans un premier temps excentré du champ de la caméra de scène de l'oculomètre (>120° d'angle visuel). Dans ce cadre, les fixations ne peuvent pas être recueillies. Toutefois, l'absence de telles données peut être compensée par le recueil des mouvements de rotation de la tête en direction du véhicule. En effet, un tel indice apparaît pertinent pour indiquer la volonté d'un conducteur de regarder vers une zone d'intérêt (Doshi & Trivedi, 2009; Land, 1992).

Les caractéristiques des indicateurs de freinages sont identifiées sur la base des mesures de pressions au niveau du pédalier. Il n'existe pas de règle claire pour l'identification des comportements de freinage (P. Green, 2013). Dans le cadre du simulateur utilisé, les participants pouvaient enfoncer la pédale frein pour un maximum de 100 crans. On considère alors comme un freinage, toute augmentation de la pression sur la pédale de frein supérieure à 33% de la moyenne des intensités de freinage de la fenêtre précédente (ex. dans le cas de la fenêtre danger, un freinage = tout appui supérieur à 33% de la moyenne des appuis de la fenêtre indice). Dans un cadre où il s'agit pour le conducteur d'éviter un danger réel dans la simulation,

ce critère apparaît suffisamment robuste pour détecter les freinages volontaires, tout en tenant compte des spécificités de chaque situation test.

Des délais ou durées brutes sont alors calculés sur la base des indicateurs bruts oculométriques et de freinages. Chaque délai brut correspond à l'écart de temps (en seconde) entre la présence d'un comportement d'intérêt (freinage et/ou fixation) et la présence d'un événement dans l'environnement (ex. apparition de l'indice / apparition du danger / fixation du danger). L'expression sur une base de temps a été choisie car les situations ont été programmées selon des contraintes temporelles. Ces délais bruts sont ensuite relativisés pour tenir compte des différences de vitesses absolues entre conducteurs, et des divergences de configuration des situations (Crundall et al., 2012). Pour relativiser ces délais, chacun est exprimé en un pourcentage de la fenêtre temporelle dans laquelle il a été mesuré (Crundall et al., 2012). Par exemple, un conducteur laisse passer 40% de la fenêtre danger, avant de fixer ce dernier. Dans les situations pour lesquelles aucun freinage ou aucune fixation n'était identifié durant la fenêtre danger, le plus mauvais score était attribué au participant. Ce score correspondait à 100% de la fenêtre pertinente, puisque le participant avait passé l'intégralité de cette dernière sans démontrer le comportement d'intérêt (Crundall et al., 2012).

8.2.5.3 Collisions : calcul du « plus faible TTC »

Pour identifier les risques de collisions dans une situation test, nous avons calculé le « plus faible *time to collision* (TTC) » observé pour chaque participant durant l'intégralité de la situation de conduite simulée (Kusano et al., 2015; Minderhoud & Bovy, 2001; Stahl et al., 2014; Van Winsum & Heino, 1996).

Le TTC exprime la quantité de temps qui sépare deux objets de l'environnement d'une collision (ici le conducteur et le danger), si le comportement des protagonistes ne change ni en terme de trajectoire, ni en terme de vitesse (Minderhoud & Bovy, 2001). Par conséquent, le « plus faible TTC » observé dans une situation test exprime la proximité maximale entre le conducteur et le danger, et donc la présence d'une collision potentielle. Cet indice a été choisi plutôt qu'une approche basée sur les données vidéo pour contrecarrer la faible résolution de la caméra de l'oculomètre et le fait que certains conducteurs pourraient avoir le regard porté vers une autre partie de l'environnement au moment de la collision éventuelle.

Si la collision est évitée, on peut en déduire que le danger a été neutralisé par le conducteur et par conséquent que les compétences d'anticipation sont efficaces. Au contraire, s'il y'a eu collision, on peut en déduire le danger n'a pas été neutralisé dans la situation, et que les compétences sont mauvaises. Dans le cadre du simulateur utilisé, aucune valeur absolue n'est disponible pour déterminer la présence ou l'absence de collision. Par conséquent, les compétences sont mesurées par une analyse des « plus faible TTC » entre les conducteurs, pour chaque situation respective.

8.2.5.4 Ralentissements anticipatoires

Pour identifier les ralentissements anticipatoires, nous calculons un coefficient d'accélération relatif. Ce coefficient a pour objectif de mesurer la perte ou le gain de vitesse de chaque conducteur, par rapport à sa vitesse initiale. Une telle approche permet de tenir compte des éventuelles différences de vitesse absolue entre les participants. Pour calculer le coefficient d'accélération relatif, la vitesse moyenne calculée (V_{mx}) dans chaque tranche d'une seconde (x) est rapportée à la vitesse initiale (V_i). La vitesse initiale correspond à la vitesse instantanée 5 secondes avant l'apparition du danger. Le coefficient d'accélération relatif peut être résumé par la formule suivante : $(V_{mPx} / V_i) - 1$.

Tableau 26, résumé des indicateurs utilisés pour les situations test couvertes et ouverte. Les indicateurs marqués d'un * ne concernent que les situations test couvertes

Situations couvertes* et ouvert

Compétence mesurée	Indicateurs	Indicateurs bruts	Données brutes	Fenêtre temporelle	Méthode de calcul
Anticipation - perception	Vitesse détection indice	Fixations (fréquence de codage : 10Hz) : 1 fixation = regard >100ms sur un même objet)	Données oculométriques (fréquence d'enregistrement : 50Hz – 0 à 120° d'angle visuel) :	Indice	$\frac{\text{Délai (apparition précurseur} \rightarrow \text{première fixation sur précurseur)}}{\text{Durée fenêtre précurseur}}$
	Durée explo indice				<i>Durée totale des fixations sur l'indice durant la fenêtre indice</i>
	Recherche danger*			Indice + danger	$\frac{\text{Délai (dernière fixation précurseur} \rightarrow \text{première fixation sur danger)}}{\text{Durée fenêtre précurseur} + \text{durée fenêtre danger}}$
	Vitesse détection danger*			Danger	$\frac{\text{Délai (apparition du danger} \rightarrow \text{première fixation sur danger)}}{\text{Durée fenêtre danger}}$
Anticipation - prise de décision	Détection danger – freinage*	Fixations (fréquence de codage : 10Hz) : 1 fixation = regard >100ms sur un même objet) Freinages (fréquence de codage : 10Hz) : 1 freinage = 1 Appui sur la pédale > 33% de la moyenne des appuis de la fenêtre temporelle précédente	Données oculométriques (fréquence d'enregistrement : 50Hz – 0 à 120° d'angle visuel) : Données issues du simulateur – pédalier (fréquence d'enregistrement : 50hz – 0 à 100 crans d'appui possible)	Danger	$\frac{\text{Délai (première fixation danger} \rightarrow \text{premier freinage)}}{\text{Durée fenêtre danger}}$
	Temps de réaction au freinage	Freinages (fréquence de codage : 10Hz) : 1 freinage = 1 Appui sur la pédale > 33% de la moyenne des appuis de la fenêtre temporelle précédente	Données issues du simulateur – pédalier (fréquence d'enregistrement : 50hz – 0 à 100 crans d'appui possible)	Danger Indice (situation ouverte uniquement)	$\frac{\text{Délai (apparition du danger} \rightarrow \text{premier freinage)}}{\text{Durée fenêtre danger}}$
	Collisions	Plus faible TTC observé	Données issues du simulateur – Time to collision (TTC : fréquence d'enregistrement : 50hz)	Danger	
	Ralentissements – coefficient accélération relatif	Vitesse moyenne par phase d'une seconde (soit 10 tranches au total) : $VmPx$ Vitesse initiale (Vinitiale)	Vitesse instantanée (Vi ; fréquence d'enregistrement : 50hz, 5 secondes avant → 5 secondes après le danger)	Pour chaque tranche d'une seconde	$\frac{VmPx}{Vinitiale} - 1$

Tableau 27, résumé des indicateurs utilisés dans la situation contrôle d'intrusion.

Situation d'intrusion					
Compétence mesurée	Indicateurs correspondants	Indicateurs bruts	Données brutes	Fenêtre temporelle	Méthode de calcul
<u>Contrôle Perception</u>	Vitesse détection danger*	Fixations (fréquence de codage : 10Hz) : 1 fixation = regard >100ms sur un même objet)	Données oculométriques (fréquence d'enregistrement : 50Hz – 0 à 120° d'angle visuel) :	Danger	$\frac{\text{Délai (apparition du danger} \rightarrow \text{première fixation sur danger)}}{\text{Durée fenêtre danger}}$
<u>Contrôle – prise de décision</u>	Détection danger – freinage	Fixations (fréquence de codage : 10Hz) : 1 fixation = regard >100ms sur un même objet) Freinages (fréquence de codage : 10Hz) : 1 freinage = 1 Appui sur la pédale > 33% de la moyenne des appuis de la fenêtre temporelle précédente	Données oculométriques (fréquence d'enregistrement : 50Hz – 0 à 120° d'angle visuel) : Données issues du simulateur – pédalier (fréquence d'enregistrement : 50hz – 0 à 100 crans d'appui possible)	Danger	$\frac{\text{Délai (première fixation danger} \rightarrow \text{premier freinage)}}{\text{Durée fenêtre danger}}$
	Temps de réaction au freinage	Freinages (fréquence de codage : 10Hz) : 1 freinage = 1 Appui sur la pédale > 33% de la moyenne des appuis de la fenêtre temporelle précédente	Données issues du simulateur – pédalier (fréquence d'enregistrement : 50hz – 0 à 100 crans d'appui possible)	Danger	$\frac{\text{Délai (apparition du danger} \rightarrow \text{premier freinage)}}{\text{Durée fenêtre danger}}$
	Collisions	Plus faible TTC observé	Données issues du simulateur – Time to collision (TTC : fréquence d'enregistrement : 50hz)	Danger	
	Ralentissements – coefficient accélération relatif	Vitesse moyenne par phase d'une seconde (soit 10 tranches au total) : $VmPx$ Vitesse initiale (Vinitiale)	Vitesse instantanée (V_i ; fréquence d'enregistrement : 50hz, 5 secondes avant → 5 secondes après le danger)	Pour chaque tranche d'une seconde	$\frac{VmPx}{Vinitiale} - 1$

8.2.6 Spécificité des analyses par situation

L'analyse des indicateurs comportementaux est basée sur des comparaisons inter-groupes, effectuées situation par situation selon les spécificités suivantes.

Dans la situation ouverte, le danger est une voiture qui est disponible à l'exploration visuelle pendant un temps très long. De fait les analyses se focalisent sur la « fenêtre indice », c'est-à-dire avant que la voiture coupe la route du conducteur en lui refusant la priorité. Compte tenu de sa différence importante de construction avec les autres types de situations, cette situation sera analysée seule. Dans ces situations, 12 observations n'ont pas pu être utilisées pour cause d'abandon du participant, ou de mal fonction de la situation (absence de voiture). Les analyses ont donc été pratiquées sur 37 participants, 18 conducteurs expérimentés et 19 conducteurs novices.

Dans les situations couvertes, le danger n'est disponible à l'exploration visuelle que pendant un temps très court. Le reste du temps, il est caché par un élément du décor potentiellement mobile ou statique. Par conséquent, les analyses sont effectuées sur les deux fenêtres « indice » et « danger » distinctement. L'analyse des variations de vitesse est effectuée distinctement pour chacune des deux situations couvertes. En effet, la configuration routière est légèrement différente entre les deux situations, ce qui pourrait influencer les variations de vitesse (Ligne droite pour la situation camion, sortie de virage et arrivée à une intersection pour la situation haie). Cependant, leurs similitudes en termes d'apparition du danger permettent une analyse comparée des indicateurs oculométriques et de freinages. Dans la situation couverte 1 (Camion), 12 observations n'ont pas pu être utilisées pour cause d'abandon du participant, ou de mal fonction de la situation (absence de piéton). Les analyses ont donc été pratiquées sur 37 participants, 21 conducteurs expérimentés et 16 conducteurs novices. Dans la situation couvertes 2 (Haie), 7 observations n'ont pas pu être utilisées pour cause d'abandon du participant, ou de mal fonction de la situation (absence de piéton). Les analyses ont donc été pratiquées sur 42 participants, 23 conducteurs expérimentés et 19 conducteurs novices.

Dans la situation d'intrusion, seule la fenêtre danger est présente. En effet, le piéton apparaît brusquement, sans être annoncé par un indice, ce qui rend caduque la présence d'une « fenêtre indice ». Dans cette situation, 14 observations n'ont pas pu être utilisées pour cause d'abandon du participant, ou de mal fonction de la situation (absence de piéton). Les analyses ont donc été pratiquées sur 35 participants, 20 conducteurs expérimentés et 15 conducteurs novices.

Les comparaisons inter types de situations ne sont pas effectuées sur les indicateurs de variations de vitesse, ou sur les indicateurs comportementaux simples. En effet, par construction, dans les situations d'intrusion, le piéton est visible avant son arrivée sur la route et donc sur le chemin du conducteur. Dans les situations couvertes, lorsque les piétons deviennent visibles, ils sont déjà sur la route et sur le chemin des conducteurs. Par conséquent, la fenêtre danger des deux situations n'est pas équivalente. Cependant, une spécificité s'applique pour l'indicateur de « plus faible TTC » et l'indicateur combiné de délai entre la première fixation sur le danger et le premier freinage subséquent. En effet, ces indicateurs neutralisent les différences de construction inter-situations en prenant pour base la présence d'un comportement de la part d'un conducteur et non pas la présence d'un événement dans l'environnement.

8.2.7 Analyses statistiques, tests et comparaisons effectués

Les analyses des indicateurs oculométriques et de freinage se déroulent en 3 étapes, qui peuvent varier selon la situation. Dans un premier temps, des analyses de variance multivariées (MANOVA) comparent les performances des conducteurs novices à celles des conducteurs expérimentés concernant le temps de détection du danger et le temps de réaction au freinage après l'apparition dudit danger. En effet, la précocité du premier freinage après la survenue d'un événement est potentiellement tributaire de la précocité du premier regard sur ce-dit événement, en particulier lorsque cet événement est un danger (Crundall et al., 2012).

Dans un second temps, des analyses de variance (ANOVA), univariées (dans le cadre des situations ouverts-abrupt et graduel qui sont analysés séparément : VI = catégorie) ou bivariées (VIs = catégorie X situations), comparent les performances des groupes pour chacun des indicateurs comportementaux, dans les fenêtres temporelles concernées. Dans le cas où l'ANOVA est bivariée, des contrastes planifiés cohérents avec nos questions de recherche et nos hypothèses sont conduits pour explorer les différences en fonction de l'expérience du conducteur.

Pour analyser l'indicateur combiné de délai entre la première fixation sur le danger et le premier freinage subséquent, nous effectuons une ANOVA bivariée comparant les catégories de conducteurs (expérimentés/novices), et les types de situation (couverte1 / couverte2 / intrusion). Des contrastes planifiés permettent alors de comparer les situations couvertes entre eux, et les catégories de conducteurs dans chaque situation indépendante.

Pour l'analyse des « plus faible TTC », une ANOVA bivariée (catégories X situations) compare les « plus faible TTC » en fonction du groupe d'appartenance des conducteurs (expérimentés/novices) et de la situation (couverte1/couverte2/intrusion). Dans la situation ouverte, une ANOVA univariée compare le « plus faible TTC » des conducteurs expérimentés aux « plus faible TTC » des conducteurs novices dans les situations ouvertes.

Deux approches sont utilisées pour analyser les variations de vitesse des deux groupes de conducteurs. La première approche consiste à identifier à partir de quel moment les conducteurs ont significativement ralenti, par rapport à leur vitesse initiale. Pour investiguer cet angle, des ANOVA indépendantes comparent la vitesse instantanée moyenne par tranche d'une seconde à la vitesse initiale pour chacun des groupes de conducteur. Au total, ce sont 10 ANOVA qui sont pratiquées, une par tranche d'une seconde, pour un total de 5 ANOVA pré-danger et 5 ANOVA post danger.

La seconde approche consiste à déterminer à partir de quel moment de la situation le coefficient d'accélération des conducteurs expérimentés diffère de celui des conducteurs novices. Pour investiguer cet angle, des ANOVA indépendantes comparent les coefficients d'accélération relatifs des conducteurs expérimentés à ceux des conducteurs novices pour chaque tranche d'une seconde. Au total, ce sont 10 ANOVA qui sont pratiquées, une par tranche d'une seconde, pour un total de 5 ANOVA pré-danger et 5 ANOVA post danger.

8.3 Résultats

Nous commençons en présentant les résultats des analyses pratiquées concernant la situation d'intrusion. Puis, nous présentons les résultats concernant l'analyse des situations couvertes, avant de comparer les situations d'intrusion et couverte sur les indicateurs pertinents. Nous finissons en présentant les résultats pour la situation ouverte.

Pour chaque situation, la présentation des résultats commence systématiquement par l'analyse des variations de vitesse. Elle se poursuit ensuite par l'analyse puis par l'analyse des indicateurs, d'abord pour la fenêtre indice, puis pour la fenêtre danger. Elle se termine par l'analyse des collisions.

Avant cela, afin de contrôler d'éventuelles différences inter conducteurs, nous exposons dans un premier temps les analyses concernant les différences de vitesse initiale. Puis, nous proposons une vue générale des variations de vitesse recueillies dans l'ensemble des situations test.

8.3.1 Différences de vitesses initiales et vue générale des variations de vitesse

On ne peut pas conclure à des différences significatives de vitesse initiale entre les conducteurs expérimentés et les conducteurs novices dans les situations d'intrusion, couvertes et ouverte (voir tableau 28). Nous pouvons considérer que, à même situation, les groupes de participants ne diffèrent pas significativement en termes de comportement de vitesse au moment d'entrer dans la zone du danger.

Tableau 28, différences de vitesse initiale (en km/h) entre conducteurs expérimentés et novices par situations

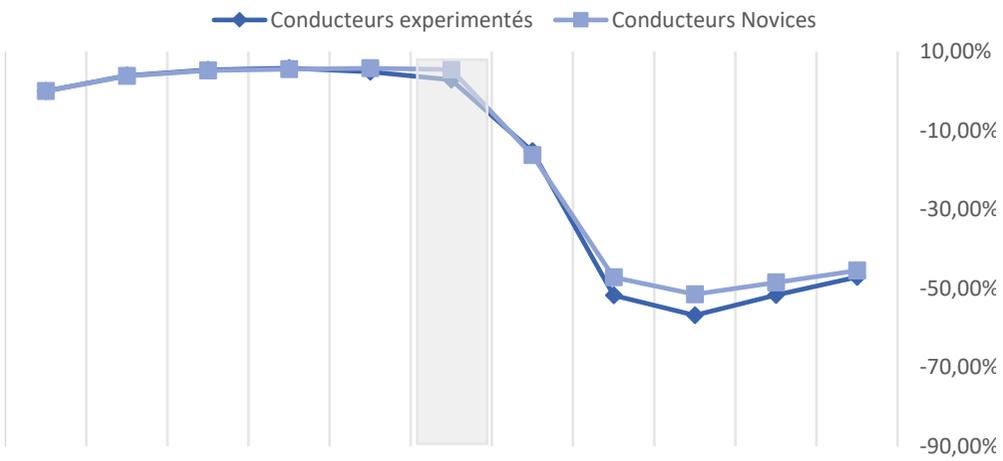
	Novice		Expérimentés		Différence	Test
	Vitesse	Ety	Vitesse	Ety		
Intrusion	44,3	4,9	42,3	6,4	2	F (1,33) = 1,06 ; p = 0,31
Couverte 1	42,8	3,8	42,9	8,2	0,01	F (1,36) = 0,003 ; p = 0,95
Couverte 2	45,7	6,7	47,1	8,7	1,4	F (1,40) = 1,73 ; p = 0,19
Ouverte	40	5,3	42,5	6,5	2,5	F (1,35) = 1,62 ; p = 0,21

L'observation des courbes dans la figure 33 indique que dans les situations couvertes et la situation ouverte, qui présentent un danger pouvant être anticipé, les conducteurs ralentissent avant l'arrivée au lieu du danger potentiel.

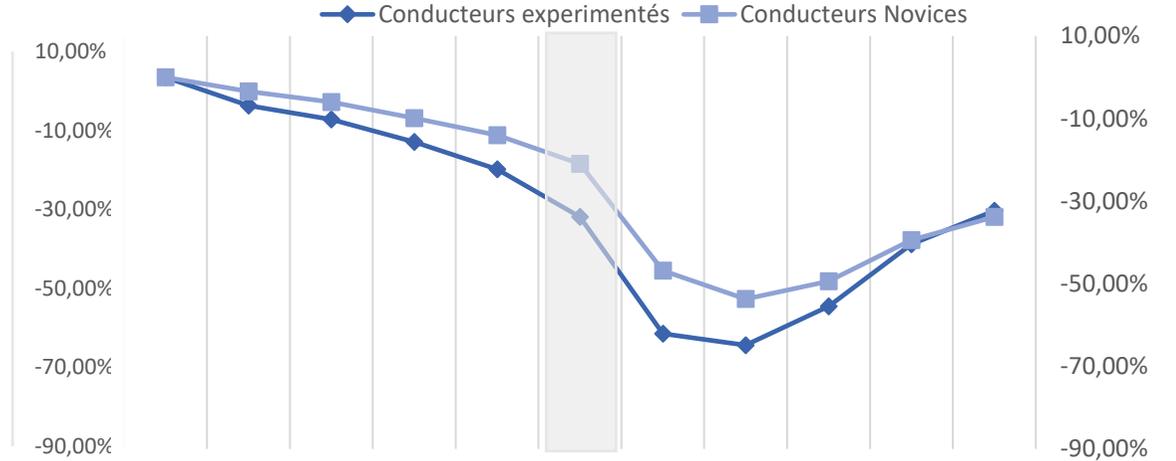
Ce n'est pas le cas dans la situation d'intrusion, dont le danger ne pouvait pas être anticipé. Dans cette situation, les conducteurs commencent à ralentir après l'apparition du danger.

Des analyses détaillées de chacune des courbes sont disponibles ci-après.

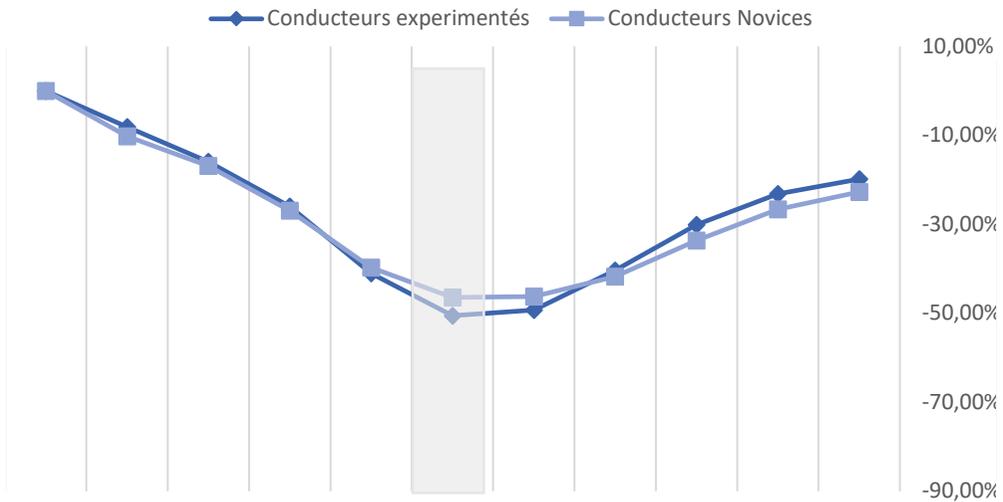
Situation d'intrusion



Situation couverte camion



Situation ouverte



Situation couverte haie

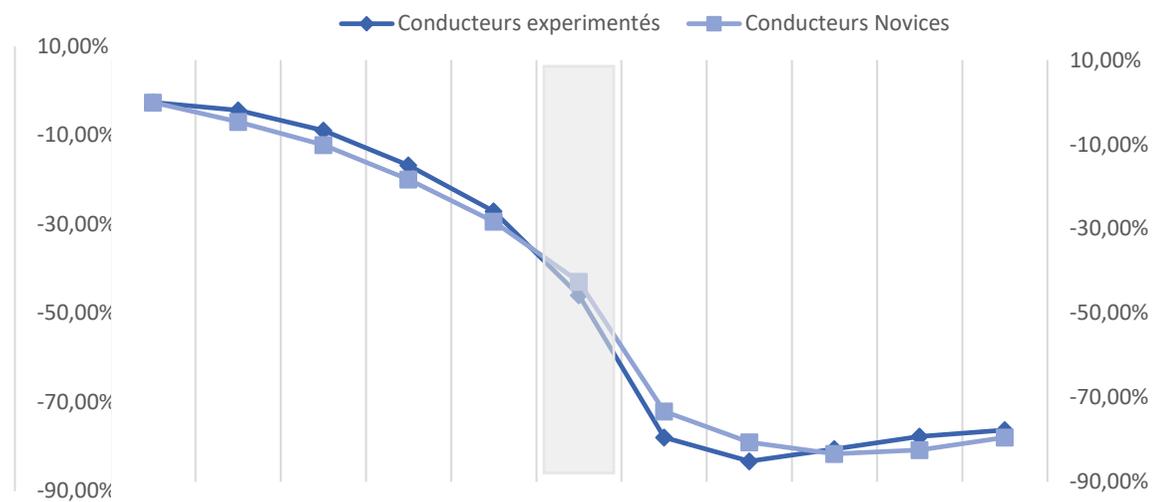


Figure 33, variations de vitesse en coefficient d'accélération relatif, pour chaque situation test. En gris, le moment d'apparition du danger

8.3.2 Les situations d'intrusion ne mettent pas en évidence de différences entre conducteurs expérimentés et novices

8.3.2.1 Analyse des variations de vitesse

Les analyses montrent que les conducteurs expérimentés comme les conducteurs novices commencent systématiquement à ralentir après l'apparition du danger (voir Figure 34). Ainsi, les conducteurs expérimentés comme novices commencent à freiner environ 1 seconde après l'apparition du danger.

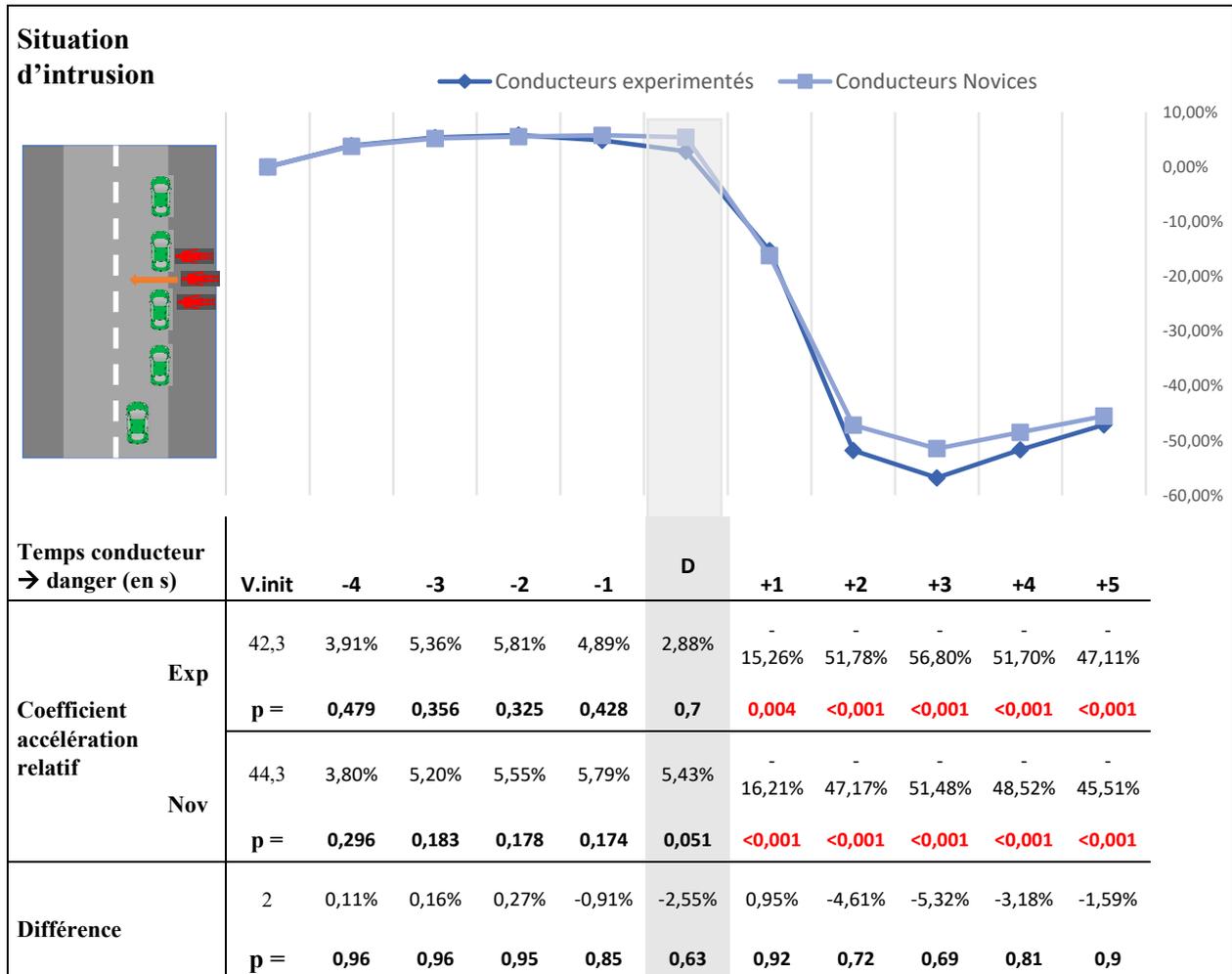


Figure 34, Coefficients d'accélération relatifs des conducteurs novices et expérimentés en fonction du temps (en seconde) pour la situation d'intrusion. L'apparition du danger (D) est signalée par une bande grise, correspond au moment de l'apparition du danger.

8.3.2.2 Analyse des indicateurs oculométriques et de freinage après l'apparition du danger (fenêtre danger)

Dans la situation d'intrusion, la MANOVA ne permet pas de conclure à une différence significative entre les catégories de conducteurs concernant la vitesse de détection du danger et le temps de réaction au freinage ($F(1,36) = 0,88$, Pillai = 0,04, $p = 0,42$).

Par ailleurs, du point de vue des indicateurs oculométriques, l'ANOVA (2X1 : catégories x situation) révèle que les conducteurs expérimentés ne fixent pas le piéton significativement plus rapidement après son apparition que les conducteurs novices (différence

= 5% ; $F(1,36) = 1,57$, $p = 0,21$; voir figure 38). Il est à noter que tous les participants sauf 2 (1 expert, 1 novice) fixent le danger avant son arrivée sur la route.

Les indicateurs de délai entre détection du danger et le premier freinage, de même que les « plus faibles TTC », sont traités conjointement avec ceux des situations couvertes. (Voir figure 39). Toutefois, les analyses ne révèlent pas de différence entre les conducteurs novices et expérimentés sur ces indicateurs.

8.3.3 Les conducteurs expérimentés anticipent plus efficacement les dangers couverts que les conducteurs novices

8.3.3.1 Analyse des variations de vitesse

Dans les situations couvertes, les conducteurs expérimentés comme les conducteurs novices commencent à freiner avant que le danger soit visible (voir figure 35 et 36). Dans la situation camion, les conducteurs expérimentés commencent à ralentir 2 secondes avant l'apparition du danger, contre 1 seconde avant l'apparition du danger pour les novices. Dans la situation haie, les conducteurs expérimentés commencent à ralentir 1 secondes avant l'apparition du danger, contre 3 secondes avant l'apparition du danger pour les novices. Toutefois, on ne peut pas conclure à des différences significatives entre conducteurs expérimentés et novices quant à leur comportement de ralentissement anticipatoires respectifs, dans aucune des deux situations.

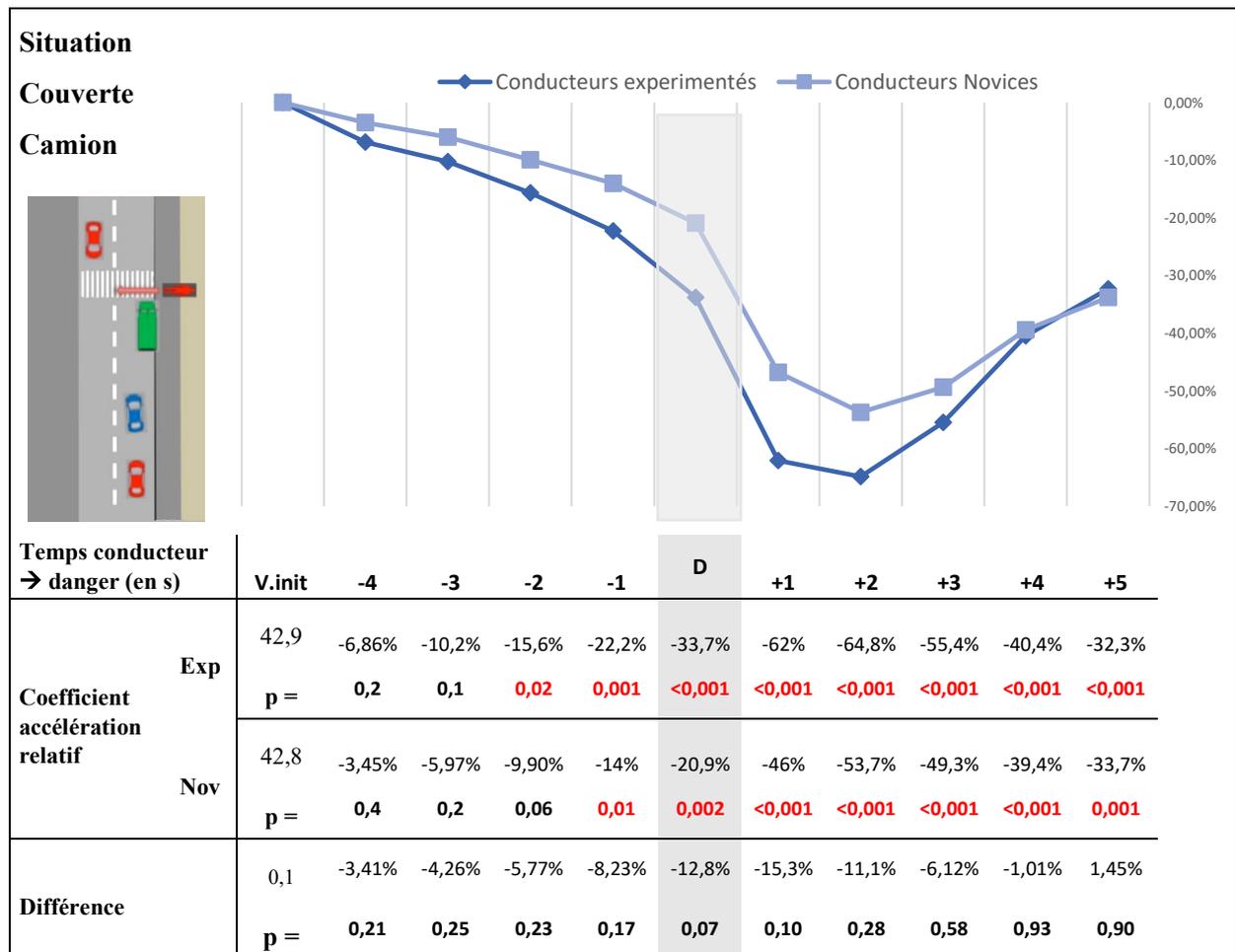


Figure 35, Coefficients d'accélération relatifs des conducteurs novices et expérimentés en fonction du temps (en seconde) pour la situation couverte 1. L'apparition du danger (D) est signalée par une bande grise, correspond au moment de l'apparition du danger.

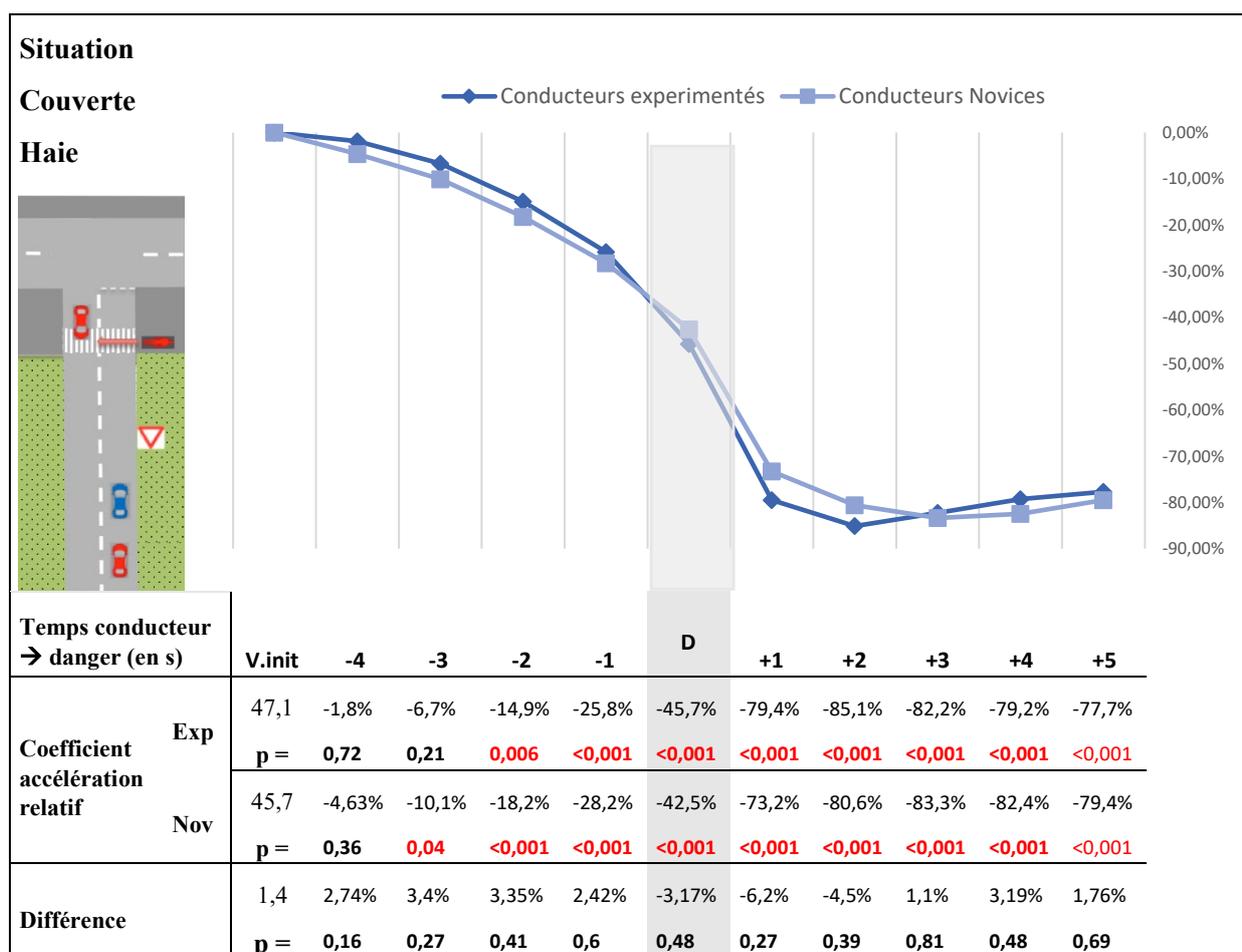


Figure 36. Coefficients d'accélération relatifs des conducteurs novices et expérimentés en fonction du temps (en seconde) pour la situation couverte2. L'apparition du danger (D) est signalée par une bande grise, correspond au moment de l'apparition du danger.

8.3.3.2 Indicateurs oculométriques avant l'apparition du danger (fenêtre indice)

Les ANOVA 2X2 : catégories X types de situation, pratiquées ne permettent pas de conclure à des effets d'interaction entre l'expérience de conduite et le type de situation, ou à des effets de l'expérience de conduite sur la vitesse de détection de l'indice (interaction : $F(1, 73) = 0,23$; $p = 0,63$; Catégorie : $F(1,73) = 0,62$; $p = 0,43$) ; sur le temps passé à explorer l'indice (interaction : $F(1, 74) = 0,03$, $p = 0,86$; Catégorie : $F(1,74) = 0,3$; $p = 0,54$).

L'ANOVA 2X2 : catégories X types de situation, révèle que le délai entre le dernier regard sur l'indice et le premier regard sur le danger est plus court de 19,5% des fenêtres « danger » et « indice » combinées pour les conducteurs expérimentés, en comparaison des conducteurs novices. Toutefois, cette différence n'est pas généralisable ($F(1, 40) = 3,99$, $p = 0,052$).

Cependant, les contrastes planifiés révèlent que dans la situation « haie », les conducteurs expérimentés observent un délai significativement plus court, équivalent à 29% des deux fenêtres combinées, entre la dernière fixation sur l'indice et la première fixation sur le danger ($p = 0,01$; voir figure 37). Dans la situation « Camion », cette différence n'est que de 4% en faveur des expérimentés et n'est pas généralisable ($p = 0,47$). Par conséquent,

spécifiquement dans la situation haie, les conducteurs expérimentés semblent démontrer des comportements d'anticipation du danger que ne présentent pas les conducteurs novices.

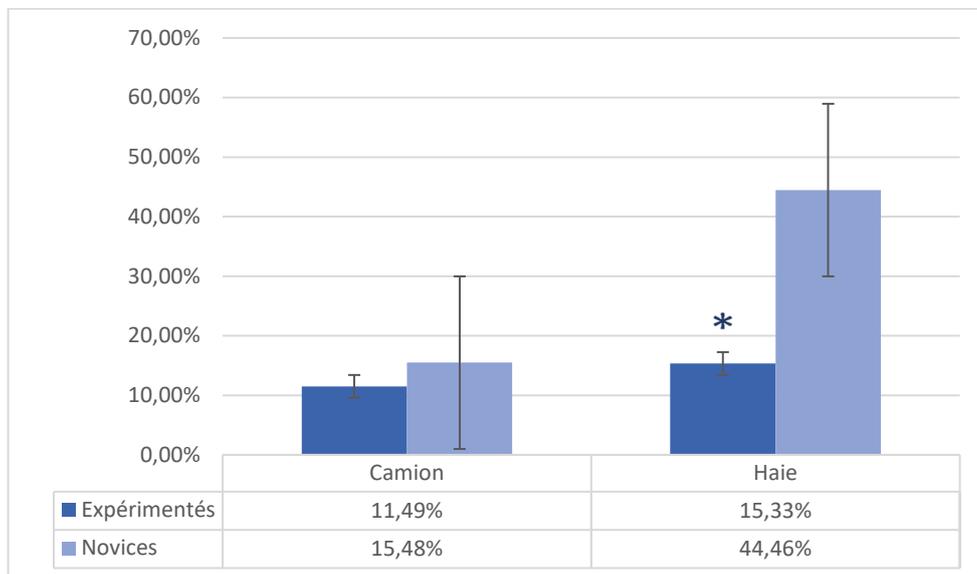


Figure 37, différences expérimentés/novices pour le délai entre la dernière fixation sur l'indice du danger, et la première fixation sur le danger dans les situations test couvertes.

Avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$

8.3.3.3 Indicateurs oculométriques et de freinage, après l'apparition du danger (fenêtre danger)

La MANOVA permet de conclure à une différence significative entre les catégories de conducteurs concernant la première fixation sur le danger après son apparition, et le premier freinage ($F(1,40) = 3,72$, Pillai = 0,16, $p = 0,03$).

Concernant la vitesse de détection du danger, l'ANOVA 2X2 : catégories X type de situation, ne révèle pas d'effet d'interaction entre l'expérience du conducteur et le type de situation ($F(1,40) = 0,15$, $p = 0,69$). Cependant, l'ANOVA révèle un effet principal de l'expérience de conduite des conducteurs. Les conducteurs expérimentés perçoivent le danger 6% de la fenêtre plus rapidement que les conducteurs novices ($F(1,40) = 0,02$).

Des contrastes planifiés révèlent que cette différence est constatée principalement dans la situation « haie » (voir figure 38). Les conducteurs expérimentés y perçoivent le danger 8,5% de la fenêtre plus rapidement que les novices ($p = 0,02$). Ce n'est pas le cas dans la situation camion, où les expérimentés ne perçoivent le danger que 3,5% de la fenêtre plus rapidement que les novices ($p = 0,21$).

Concernant le délai entre la détection du danger et le premier freinage subséquent, l'ANOVA 2X3 : catégories x types de situation, ne révèle pas d'effet d'interaction entre l'expérience du conducteur et le type de situation ($F(1,38) = 1,05$, $p = 0,35$). Néanmoins, l'analyse révèle un effet principal de l'expérience. Les conducteurs expérimentés freinent 11% de la fenêtre danger plus rapidement après avoir vu un danger que les conducteurs novices ($F(1,38) = 9,1$, $p = 0,004 < 0,01$), sur l'ensemble des situations.

Les contrastes planifiés révèlent cependant que cet effet est cantonné aux situations couvertes (voir figure 38). Les conducteurs expérimentés y freinent 16,15% de la fenêtre danger plus rapidement après avoir vu un danger que les conducteurs novices ($p = 0,004$). Cette différence n'est pas significative dans la situation d'intrusion, dans laquelle les novices freinent

pourtant 6% de la fenêtre danger plus lentement que les expérimentés, après avoir vu le danger ($p = 0,2$)

Des analyses supplémentaires révèlent que cette différence est constatée dans les deux situations couvertes. Dans la situation camion, les expérimentés freinent 16,3% de la fenêtre indice plus rapidement, après avoir fixé le danger ($p = 0,032$). Cette différence est de 16% en faveur des expérimentés dans la situation haie ($p = 0,022$).

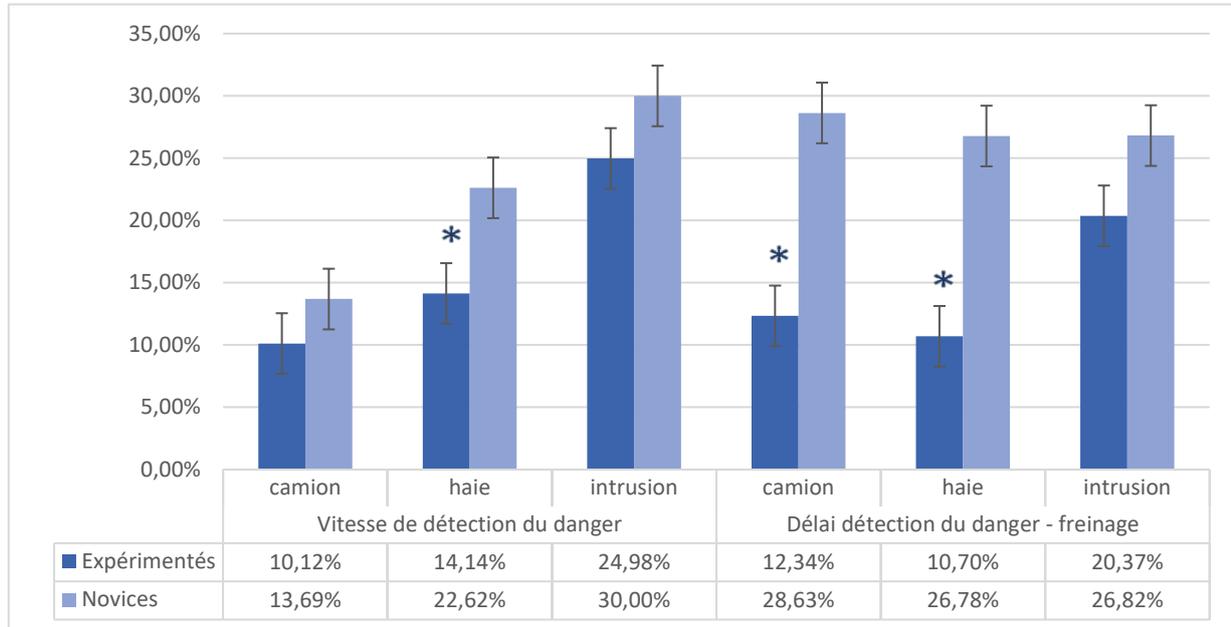


Figure 38, pourcentages de la fenêtre danger écoulé pour chaque type d'indicateur, par type de situation. Avec barres d'erreur. * = $p < 0,05$

8.3.3.4 Collisions

L'ANOVA 2X3 : catégories X types de situation, pratiquée sur les « plus faible TTC » observés, ne révèle pas d'effet d'interaction entre l'expérience du conducteur et le type de situation ($F(2,38) = 0,007$; $p = 0,9$). Elle ne révèle pas non plus d'effet principal de l'expérience du conducteur en fonction de la situation ($F(1,38) = 2,8$; $p = 0,1$).

Néanmoins, un effet principal du type de situation est observé ($F(2, 70) = 5,4$; $p < 0,01$). Des contrastes révèlent que les conducteurs semblent subir moins de collisions dans la situation camion, en comparaison des deux autres situations (voir figure 39). Dans la situation camion, le « plus faible TTC » des conducteurs est supérieur de 0,26 seconde en comparaison de la situation d'intrusion ($p = 0,01$), et de 0,34 seconde en comparaison de la situation couverte haie ($p < 0,001$). Par ailleurs, les contrastes ne révèlent pas de différence significative en termes de « plus faible TTC » observé entre les situations d'intrusion et la situation couverte haie (différence = 0,08 seconde ; $p = 0,4$).

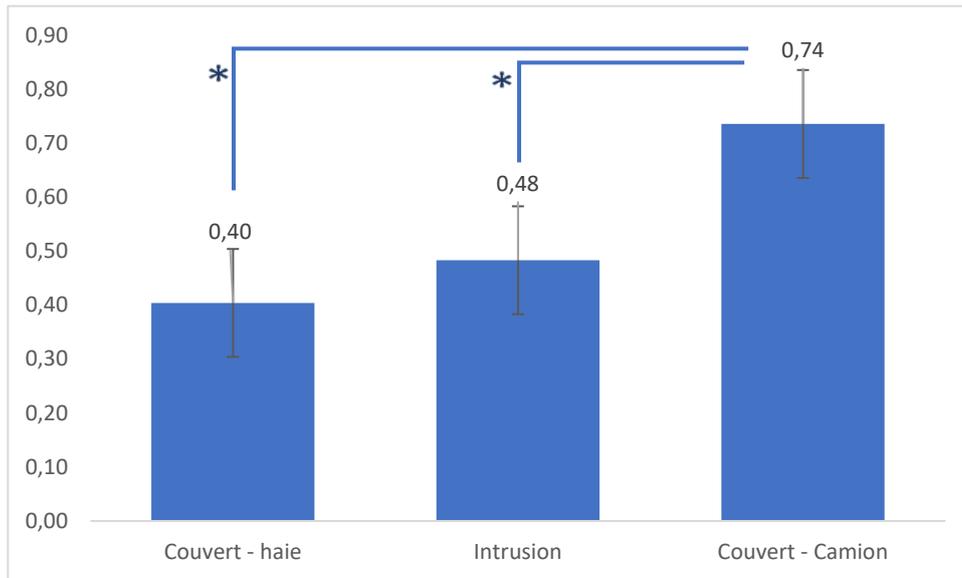


Figure 39, plus faible TTC moyen observé par situation (en seconde), avec barres d'erreur. * = $p < 0,05$

8.3.3.5 Différences inter-situations couvertes

Les analyses pratiquées sur les indicateurs révèlent des différences entre les deux situations couvertes. Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la situation « haie » semble plus difficile que la situation « camion ». En effet, le danger et l'indice y sont regardés plus tard, l'indice y est fixé moins longtemps et les conducteurs y démontrent moins de comportement de recherche de danger. Par ailleurs, il apparaît plus dangereux, car les conducteurs y connaissent des « plus faibles TTC moyens » plus bas que dans les autres situations. Ces différences sont résumées graphiquement dans la figure 40.

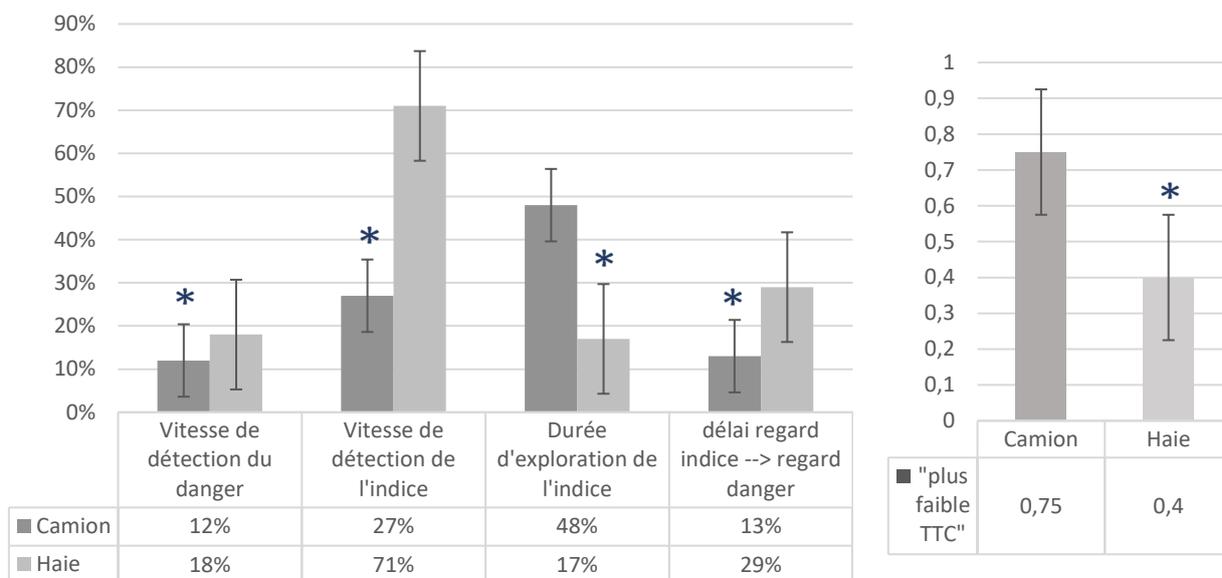


Figure 40, différences entre scénarios couverts camion et haie. Les différences sont exprimées en un pourcentage écoulé de la fenêtre correspondante, excepté pour le pire TTC moyen, dont la différence est exprimée en seconde. * = $p < 0,05$

8.3.4 Les conducteurs expérimentés anticipent plus efficacement les dangers ouverts que les conducteurs novices en situations ouvertes

8.3.4.1 Analyse des variations de vitesse

Les conducteurs novices commencent à ralentir au moins 4 secondes avant d'arriver au danger (voir Figure 41). Les conducteurs expérimentés, commencent à ralentir 3 secondes avant d'arriver au danger. Cependant, on ne peut pas conclure à des différences de coefficient d'accélération relatif significative entre les catégories de conducteurs sur l'ensemble de la situation.

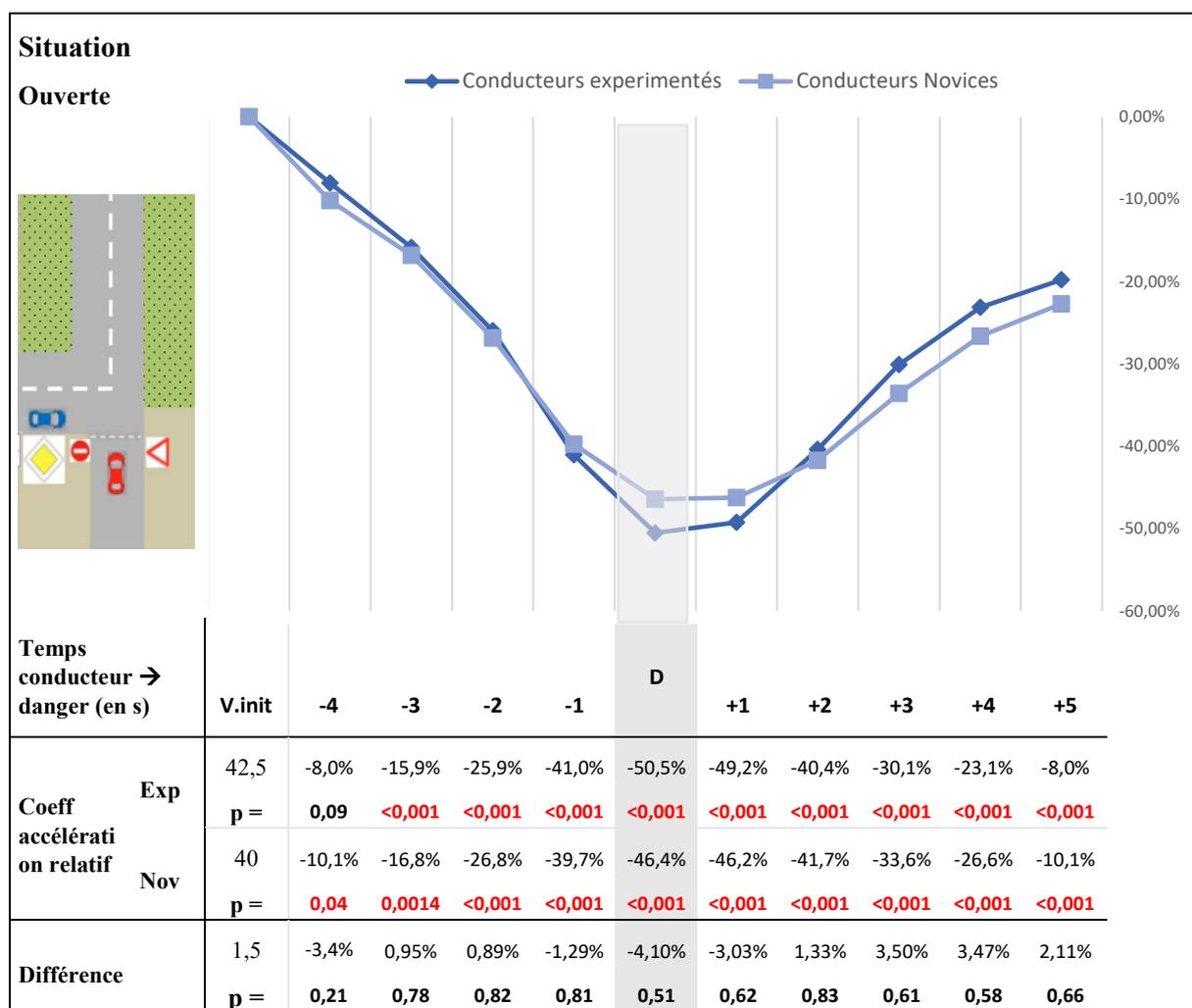


Figure 41, Coefficients d'accélération relatifs pour les deux catégories de conducteur, ainsi que les différences de coefficient d'accélération entre conducteurs novices et expérimentés. Ils sont accompagnés des résultats des ANOVA pratiquées

8.3.4.2 Analyse des indicateurs oculométriques, de freinages et des collisions

La MANOVA permet de conclure à une différence significative entre les catégories de conducteurs ($F(1,35) = 3,88$, Pillai = 0,18, $p = 0,01$).

L'ANOVA 2X1 : catégories X type de situation, pratiquée sur la vitesse de détection de l'indice indique que les conducteurs expérimentés ne détectent pas l'indice significativement plus rapidement que les conducteurs novices (différence = 10% ; $F(1,34) = 0,381$, $p = 0,541$). De la même manière, L'ANOVA (2X1 : catégories / situation) pratiquée sur la durée d'exploration de l'indice indique que les conducteurs expérimentés ne fixent pas l'indice plus longtemps que les conducteurs novices (différence = 2% ; $F(1,34) = 1,284$, $p = 0,265$).

Au contraire, l'ANOVA 2X1 : catégories X type de situation, pratiquée sur les temps de réaction au freinage, après l'apparition de l'indice révèle que les conducteurs expérimentés freinent l'équivalent de 20% de la fenêtre indice plus tôt que les conducteurs novices avant le danger ($F(1,35) = 5,6$, $p = 0,02$; voir figure 42).

Toutefois, ces différences ne se traduisent pas par des différences inter-conducteurs en termes de collisions. En effet, Les conducteurs expérimentés ne diffèrent pas des novices au niveau du « plus faible TTC » ($F(1,35) = 0,5$; $p = 0,446$).

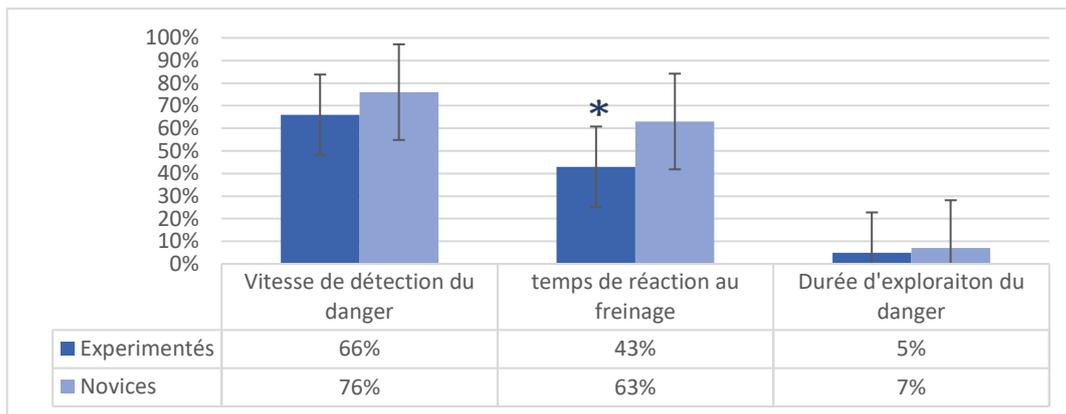


Figure 42, différences expérimentés/novices dans la situation ouverte. * = $p < 0,05$

8.4 Discussion

Cette seconde étude avait pour objectif de proposer une opérationnalisation d'indicateurs et de situations associées pour mesurer les compétences perceptives et cognitives des conducteurs, en réalité virtuelle.

Dans un premier temps, nous discutons les résultats obtenus sur les indicateurs utilisés, situation par situation. Une situation ouverte mesurait les compétences d'anticipation des conducteurs lorsqu'un danger était visible. Deux situations couvertes mesuraient les compétences d'anticipation des conducteurs, lorsque le danger n'était pas visible. Une situation d'intrusion servait de contrôle, car elle ne sollicitait pas les compétences d'anticipation.

Dans un second temps, nous discutons les différences inter-situations couvertes observées. En effet, ces situations proposent un profil présentant de fortes similarités, mais des résultats divergents, notamment au niveau des conducteurs novices. Dans un dernier temps, nous discutons les implications théoriques soulevées par nos résultats.

8.4.1 *Evaluer les compétences perceptives et cognitives des conducteurs en réalité virtuelle*

8.4.1.1 *Evaluer les compétences d'anticipation lorsque le danger est visible*

Nos résultats montrent que lorsque le danger est visible de loin, Les conducteurs expérimentés ont de meilleures compétences d'anticipation que les conducteurs novices. En effet, les expérimentés freinent plus précocement que les novices, avant d'arriver au lieu du danger. Ces résultats sont similaires à ceux observés dans la littérature (Bjørnskau & Sagberg, 2005; Munduteguy & Ragot-Court, 2011). Ils indiquent que les conducteurs novices ont plus de difficultés que les conducteurs expérimentés pour déterminer les intentions des autres conducteurs.

Cependant, ces résultats ne sont pas expliqués par des différences des compétences de perception. En effet, les conducteurs expérimentés ne diffèrent des conducteurs novices ni sur la rapidité à détecter le danger potentiel, ni sur le temps passé à l'explorer. Ces résultats sont similaires aux résultats observés par Crundall et al., (2012). Les auteurs les interprètent comme l'indication d'une surveillance passive, périphérique du danger potentiel par les conducteurs expérimentés. Ces derniers s'économiseraient ainsi une surveillance active du conducteur potentiellement dangereux, coûteuse en ressources. Les conducteurs novices, inconscients du risque potentiel n'effectueraient quant à eux ni surveillance active, ni surveillance passive.

Nos résultats sont toutefois à nuancer. Ainsi, malgré la différence de précocité de freinage démontrée par nos conducteurs, un tel comportement n'est pas traduit par une vitesse plus adaptée et par moins de collisions.

8.4.1.2 *Evaluer les compétences d'anticipation lorsque le danger n'est pas visible*

Lorsque le danger est caché par un élément du décor, les conducteurs expérimentés détectent plus rapidement le danger lorsqu'il apparaît que les conducteurs novices. De plus, les conducteurs expérimentés freinent également plus vite après avoir détecté le danger que les conducteurs novices. Par ailleurs, notamment dans la situation haie, les conducteurs expérimentés démontrent des comportements de recherche active du danger que ne démontrent pas les novices. En effet, ils observent un délai plus court entre le dernier regard sur l'élément cachant le danger et le premier regard sur le danger, après son apparition. Par conséquent, lorsque le danger apparaît, les expérimentés auraient leur regard positionné au plus près du lieu d'apparition potentiel identifié.

Ces résultats sont similaires avec ceux retrouvés dans la littérature (ex. Brown & Groeger, 1988; Crundall et al., 2003; McKnight & McKnight, 2003). Ils indiquent une supériorité de la part des conducteurs expérimentés sur les compétences d'anticipation des dangers (Crundall et al., 2012; Fuller, 2005; Pradhan et al., 2005). Par ailleurs, Ils renforcent l'hypothèse d'un apprentissage lent des compétences perceptives et cognitives nécessaires à l'anticipation des dangers cachés.

Toutefois, ces différences pourraient également être expliquées par une supériorité des conducteurs expérimentés en termes de temps réaction au freinage ou pour détecter les dangers visuellement. Dans ce cadre, les situations d'intrusion servent de situation contrôle. En effet, la comparaison des mêmes indicateurs, sur deux types de situations, sollicitant ou non les compétences d'anticipation, permet d'isoler ces dernières. Nous avons notamment effectué cette comparaison sur l'indicateur combiné de délai entre la détection du danger, et le premier freinage subséquent. Les conducteurs expérimentés observent un délai plus court que les novices entre leur première fixation sur le danger et le premier freinage subséquent. Or, les conducteurs expérimentés et novices ne diffèrent pas sur cet indicateur, dans le cadre de situations d'intrusion. Par conséquent, ce sont bien les compétences d'anticipation des conducteurs qui sont mesurées dans les situations couvertes avec les indicateurs utilisés.

8.4.2 Des compétences d'anticipation influencées par des différences de surfaces entre situations couvertes

Dans les situations couvertes, les caractéristiques de l'indice qui cache le danger pourraient jouer un rôle dans le déploiement des compétences d'anticipation. En effet, les deux situations « camion » et « haie » utilisées possèdent une structure similaire, mais des traits de surface différents. Les performances des conducteurs sur l'ensemble des indicateurs y sont différentes. Ces différences pourraient ainsi provenir des caractéristiques de surface de l'indice du danger.

En effet, dans la situation couverte « camion », le danger est détecté en moyenne plus vite par l'ensemble des conducteurs, et il y'a moins de collisions potentielles que dans la situation couverte « haie ». De plus, sur l'ensemble des conducteurs le camion est fixé plus tôt et plus longtemps que la haie. Par ailleurs, dans la situation « camion », les conducteurs expérimentés ne démontrent pas plus de comportements de recherche active du danger et ne regardent pas plus tôt l'indice cachant le danger que les conducteurs novices. Ce résultat peut être interprété comme la présence d'une surveillance passive et périphérique d'un indice facile à repérer et interpréter dans l'environnement (Crundall et al., 2012). Au contraire, dans la situation « Haie », un comportement de recherche active du danger est démontré par les conducteurs expérimentés, mais pas par les novices. Ainsi, les conducteurs expérimentés multiplient les regards entre la haie et la route, pour détecter le plus rapidement possible l'apparition d'un danger éventuel. Un tel comportement n'est pas retrouvé chez les conducteurs novices, qui pourraient ne pas avoir identifié la « haie » comme un indice préfigurant du danger.

La difficulté à comprendre qu'une situation contient un danger caché potentiel pourrait provenir de la disponibilité du schéma de situation adapté à sa reconnaissance pour le conducteur (Brehmer, 1994; Fuller, 2005; Williams, 2013). Dans l'étude 1 et dans la littérature, la majorité des situations critiques rencontrées par les novices impliquent au moins un autre véhicule (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; Seacrist et al., 2018). Par conséquent, une hypothèse pourrait être que les situations « camion » sont plus habituelles pour les conducteurs que les situations « haie ». Les situations camions possèderaient ainsi une similarité de structure et de surface importante avec les schémas de situation déjà possédés en mémoire par le conducteur. Au contraire, les situations « haie » pourraient être plus lointaines des situations habituellement rencontrées par les novices. C'est-à-dire qu'elles possèderaient

une similarité de surface faible avec les schémas de situation du conducteur. Par conséquent dans la situation « haie » les conducteurs novices, peu habitués à ce type de situation ne reconnaîtraient pas la présence d'un danger potentiel et ne seraient pas capable de mettre en place les comportements appropriés pour le maîtriser. Au contraire, les conducteurs expérimentés, conscients d'être dans une situation risquée recherchaient activement le danger dans la situation, en plus de se préparer à un freinage d'urgence.

8.4.3 Implications théoriques

Ces résultats ont plusieurs implications théoriques pour les modèles de l'évaluation et de la prise de décision, notamment en situations dont le danger peut être anticipé. En premier lieu, ils confirment la présence de deux types au moins de perception de l'environnement de conduite : passive et active (Gugerty, 2011). En second lieu, ils indiquent la présence d'une étape supplémentaire « d'amorçage » dans le processus de prise de décision opérationnelle. Ces implications théoriques sont schématisées dans la figure 43.

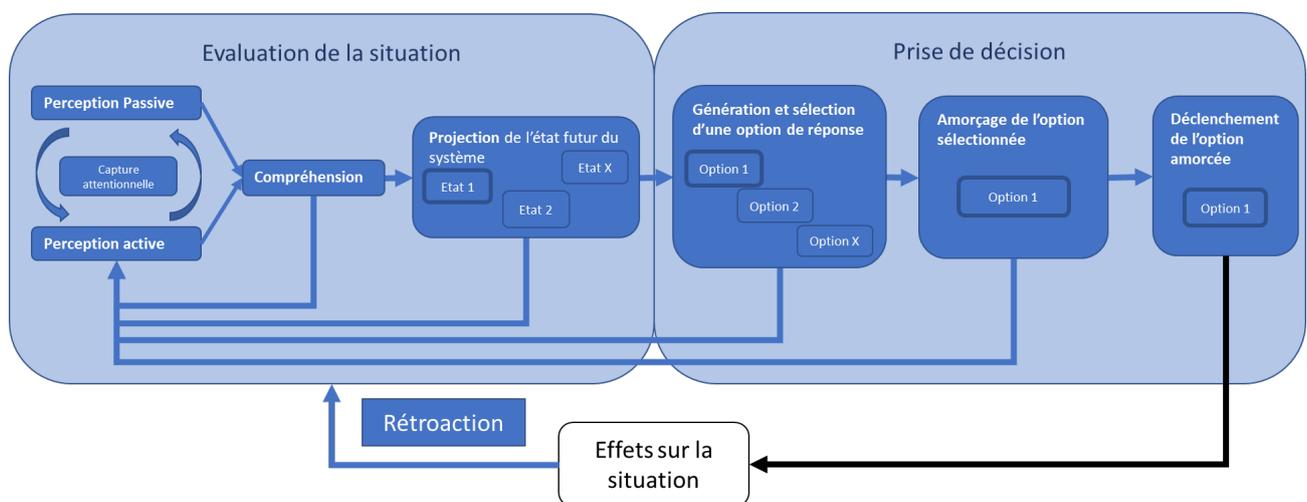


Figure 43, modèle de l'évaluation et de la prise de décision anticipatoire opérationnelle, en situation de conduite dynamique et complexe

8.4.3.1 Deux types de perception de l'environnement de conduite

Nos résultats sont une confirmation empirique supplémentaire de la présence de comportements anticipatoires d'exploration visuelle de la route chez les conducteurs (Fuller, 1984, 2005). Notamment, ils mettent en évidence une perception « active » utilisant la vision focale. Cette dernière est guidée par les connaissances, l'évaluation de la situation et par un objectif de recherche d'éléments d'intérêt dans l'environnement pour l'efficacité et la sécurité de la conduite. Ils mettent également en évidence la perception « passive », utilisant la vision périphérique. Cette dernière est guidée par l'environnement et a pour objectif de diriger le véhicule et de repérer les éléments mouvants en périphérie. Lorsqu'un tel mouvement est repéré, un phénomène de capture attentionnelle permet de recentrer la vision focale sur un élément perçu en vision périphérique (Yantis & Jonides, 1984).

Dans nos données, la différence entre perception passive et active s'observe par comparaison des indices oculométriques dans les situations couvertes et d'intrusion. Dans les situations couvertes, les conducteurs expérimentés démontrent des comportements de recherche du danger que ne démontrent pas les conducteurs novices. Ils détectent plus rapidement les dangers lorsqu'ils apparaissent car ils regardent des zones plus proches de l'apparition du lieu du danger potentiel. Il démontre alors une perception active de l'environnement. Ils anticipent les lieux d'apparition potentiel des dangers et focalisent leur attention dessus pour les détecter plus rapidement le cas échéant.

Au contraire, dans les situations d'intrusion ou le danger ne peut pas être anticipé, les conducteurs expérimentés ne détectent pas plus vite les dangers que les conducteurs novices. L'apparition du danger est détectée par la perception « passive », en vision périphérique. Un phénomène de capture attentionnelle intervient alors pour recentrer la vision focale sur le danger détecté. Ce phénomène n'apparaît pas être influencé par l'expérience dans notre étude.

8.4.3.2 Une étape d'amorçage supplémentaire dans le processus de prise de décision

L'analyse de l'indicateur combiné de délai entre la détection du danger et le freinage subséquent suggère l'existence d'une étape d'amorçage comportemental anticipatoire de la part des conducteurs expérimentés. En effet, dans les situations couvertes, les conducteurs expérimentés mettent significativement moins de temps à freiner que les conducteurs novices, après avoir vu le danger.

Sur la base des processus décrits par les modèles classiques de la prise de décision (Flin et al., 2008; Klein, 2008; Klein et al., 1986), nous proposons le processus suivant. Lors de la phase d'évaluation de la situation, les étapes de compréhension et de projection permettent au conducteur d'émettre une hypothèse sur l'état futur du système. Sur la base de son hypothèse (ex. un piéton peut sortir de l'arrière du camion), une réponse (ex. un freinage) est sélectionnée par le conducteur. Une fois sélectionnée, elle ferait alors l'objet d'un amorçage. Lorsque le piéton surgit, cet amorçage permet le déclenchement plus rapide de l'action.

Ce processus de prise de décision anticipatoire aurait lieu au niveau opérationnel dans les situations où un danger d'apparition brutale peut être anticipé. Dans le cas où le danger ne peut pas être anticipé, l'hypothèse permettant l'amorçage ne peut pas être générée. Par conséquent, le processus d'amorçage ne peut pas être mis en place. De ce fait, le déclenchement du freinage est ralenti (M. Green, 2000).

8.5 Limites, conclusion et perspectives

8.5.1 Limites

Plusieurs limites sont à prendre en compte. La première est due à la structure de l'expérimentation. Dans notre protocole, peu de situations test sont présentées aux participants, de façon à limiter les effets d'attente ou d'entraînement. De tels effets auraient en effet pu biaiser les résultats et rendre caduque les analyses comparées des situations et des indicateurs (Vlakveld et al., 2011).

La seconde limite est liée à l'échantillon. Ainsi, les différences notables entre expérimentés et novices en termes de kilométrage parcouru sont fondées sur des informations déclaratives. Cependant, à défaut de lignes claires et précises pour différencier conducteurs expérimentés et novices dans la littérature, nous avons tenté d'opposer une population d'habités de la conduite, à une population de néophytes du même âge. Cette classification a pour avantage de tenir compte des habitudes de conduite des participants, mais également de limiter les effets de l'âge sur les performances.

Enfin, contrairement à la littérature (Crundall et al., 2010, 2012; Wang et al., 2010) nous ne constatons pas de différence entre les expérimentés et les novices sur les indicateurs de ralentissement anticipatoires. Cependant, à l'instar de l'étude de Crundall et al., (2012) cette absence de différence ne concerne que la comparaison expérimentés/novices. En effet, tous les conducteurs commencent à ralentir avant l'arrivée au lieu du danger, dans les situations ouvertes et couvertes. Or, ce ralentissement anticipatoire n'est pas constaté dans la situation d'intrusion. Par conséquent, ces configurations de situations pourraient être maîtrisées par l'ensemble des conducteurs, bien que les conducteurs expérimentés y démontrent tout de même de meilleures compétences d'anticipation.

8.5.2 Conclusion et perspectives

Cette étude avait pour objectif l'outillage de la réalité virtuelle pour l'évaluation des compétences perceptives et cognitives de conduite. Pour ce faire, 2 groupes de conducteurs (expérimentés et novices) ont été confrontés à 3 types de situations de conduite contenant un danger dans un simulateur. Les situations ouverte et couvertes permettaient de solliciter les compétences d'anticipation des conducteurs. La situation d'intrusion, qui contenait un danger qui ne pouvait pas être anticipé servait de situation contrôle. Les compétences d'anticipation étaient évaluées en premier lieu par la comparaison entre conducteurs expérimentés et novices, situation par situation. Dans un second temps, pour les indicateurs le permettant, des comparaisons entre les situations couvertes et la situation d'intrusion étaient effectuées.

En premier lieu, nos résultats indiquent la pertinence de l'utilisation d'indicateurs combinés pour dépasser les limites des indicateurs classiques. Ces indicateurs permettent en effet d'expliquer les différences inter-conducteurs constatées mais non expliquées dans la littérature (Crundall et al., 2003, 2012; Pradhan et al., 2005). Ils permettent d'abord d'accéder à des comportements d'anticipation complexes et difficilement mesurables tels que la recherche active du danger, ou l'amorçage de manœuvres d'évitement. Ensuite, ils permettent des comparaisons inter-situations autrement impossibles. Par exemple, l'indicateur combiné de délai entre la première fixation sur le danger et le premier freinage subséquent a permis d'identifier un potentiel amorçage anticipatoire d'un freinage chez les conducteurs expérimentés. Cette identification a été rendue possible par une comparaison inter-conducteurs mais également inter-situations. En effet, cet indicateur permet de neutraliser les différences de construction entre situations couvertes et situation d'intrusion, qui présentent toutes les deux l'apparition abrupte d'un danger. La présence d'un amorçage n'est alors constatée que dans les situations couvertes. Un tel indice permet d'expliquer les temps de réaction au freinage plus court en situations « prévues » et « prévisibles » constatés dans la littérature (M. Green, 2000). Ils évaluent alors directement les comportements d'anticipation des conducteurs.

Dans une perspective développementale, ces résultats soulignent l'importance du contrôle des traits de surface pour moduler la proximité entre situation d'apprentissage et situation de test (Ivancic & Hesketh, 2000; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). En effet, un comportement de recherche active du danger n'était constaté que lors de la situation couverte « haie » et non lors de la situation couverte « camion ». Par ailleurs, la comparaison inter-situation sur les autres indicateurs révèle que les conducteurs anticipent plus efficacement la situation camion en comparaison de la situation haie. Ces résultats indiquent que les situations dont le danger est caché par un objet potentiellement mobile pourraient être plus « proches » des situations habituellement rencontrées par les conducteurs. Ces derniers possèderaient ainsi plus couramment les schémas de situations nécessaires à leur maîtrise. Au contraire, les situations dont le danger est caché par un élément statique pourraient être plus « lointaines » des situations habituellement rencontrées par les conducteurs. Par conséquent, les conducteurs possèderaient moins souvent et en moins bonne qualité les schémas de situations nécessaires à la maîtrise de ces situations.

Ces résultats ont également plusieurs implications pratiques au niveau de l'outillage technique des simulateurs. En premier lieu, ils indiquent la nécessité d'avoir un outil précis d'analyse des collisions. En effet, notre méthode ne permet pas de dégager de différences entre expérimentés et novices sur ce point, différence pourtant largement constatée en situation réelle (Mayhew, Simpson, & Pak, 2003; McCartt et al., 2003; ONISR, 2017). Cette absence pourrait être due à la construction des situations, mais également être issue de notre méthode par le calcul du « plus faible TTC » (Stahl et al., 2014). En effet, nous ne disposons pas de valeurs de référence issue du système pour signaler l'impact entre les deux objets 3D (véhicule/danger). Par conséquent, il est possible que nos résultats ne reflètent pas réellement les collisions

advenues. De même, à défaut de logiciels adaptés, nous avons dû réaliser un certain nombre de transformations sur nos données pour obtenir des résultats analysables (codage manuel et relativisation des indicateurs oculométriques et de freinages, calcul coefficient d'accélération relatif). Des logiciels performants pourraient ainsi d'une part faciliter l'analyse, et d'autre part permettre l'accès à des données d'intérêt supplémentaires et novatrices pour l'étude des compétences.

9 Etude 3 : Développer les compétences perceptives et cognitives en réalité virtuelle : évaluation de 2 modalités de rétroactions formatives

Cette étude a été approuvée par le Comité pour les Recherches impliquant la Personne Humaine (CRPH) de l'IFSTTAR (voir annexe).

9.1 Introduction

Sur la base des situations et principes d'évaluation des compétences identifiés dans l'étude 2, cette étude aura pour objectif d'évaluer l'efficacité de la réalité virtuelle pour l'apprentissage des compétences de conduite d'anticipation. Deux modalités de rétroactions formatives immédiates seront comparées : intradiégétique et extradiégétique.

La mesure de l'effet de transfert est le moyen le plus efficace pour évaluer l'efficacité de l'apprentissage en simulateur (Rolfe & Caro, 1982). Un transfert à lieu lorsque « l'apprentissage dans un certain contexte ou une certaine configuration matérielle impacte la performance dans un autre contexte ou une autre configuration matérielle » (Perkins & Salomon, 1992, p.3).

Un transfert peut être évalué de deux façons. La première est le transfert des compétences apprises en simulateur sur la performance des conducteurs sur route réelle (ex. accidentologie, infractions). La seconde est le transfert de l'apprentissage sur des situations plus ou moins similaires à la situation d'apprentissage (Fisher et al., 2007; Ivancic & Hesketh, 2000; Vlakveld et al., 2011). La seconde modalité est retenue. En effet, pour des questions faisabilité temporelle et logistique, des tests contrôlés sur route réelles n'ont pu être envisagés à ce stade de développement des outils sur simulateur.

9.1.1 Distance inter-situations pour évaluer l'effet de transfert de l'entraînement

La distance inter-situations est fonction de la similarité de structure et de surface qu'entretiennent la situation d'apprentissage et la situation de test. Deux situations de conduite ont une structure similaire lorsqu'elles présentent un danger qui peut être résolu en utilisant les mêmes stratégies d'action (Holyoak & Koh, 1987). Deux situations de conduite ont une surface similaire lorsqu'elles présentent des caractéristiques semblables (configuration routière, décor), qui ne changent ni le danger potentiel, ni les stratégies à réaliser pour neutraliser ce danger. Dans le cadre de l'apprentissage de la conduite en simulateur, une question centrale est celle de la « distance » du transfert. En effet, aucune formation ne serait capable de couvrir l'ensemble des situations potentiellement dangereuses de la conduite. Il faut toutefois noter que les notions de similarité inter-situations « sont des notions intuitives, qui résistent à une codification précise. Elles sont utiles pour caractériser largement certains aspects du transfert, mais n'impliquent pas de mesure stricte de la notion de similarité » (Perkins & Salomon, 1992, p.4).

Une approche efficace pour l'évaluation du transfert est la comparaison de situations possédant la même structure, mais pas la même surface (Agrawal et al., 2017; R. W. Allen et al., 2011; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Trois types de situations se différencient des situations d'entraînement du point de vue de la surface : les situations similaires, proches et lointaines (R. W. Allen et al., 2011; Ivancic & Hesketh, 2000; Pollatsek et al., 2006; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Les situations similaires possèdent des traits de surfaces en tous points identiques à ceux de la situation d'entraînement. Tous les traits de surface et de structure présents dans la situation d'entraînement y sont disponibles. Les situations proches possèdent également un grand nombre de traits communs avec la situation d'entraînement. Cependant, elles en possèdent moins que la situation similaire. Les situations lointaines diffèrent sur un grand nombre de traits de surface, en comparaison des situations d'entraînement. Néanmoins,

elles présentent un problème similaire à la situation d'entraînement, qui peut être résolu en utilisant les mêmes stratégies d'action.

Les résultats de l'étude 2 mettent en évidence certaines caractéristiques modulant la similarité de surface entre situations contenant un danger potentiel. En effet, les situations couvertes dont le danger est caché par un élément potentiellement mobile (camion) sont mieux anticipées que les situations dans lesquelles le danger est caché par un objet statique de l'environnement (haie). Ces différences indiquent que la proximité inter situation pourrait notamment dépendre des caractéristiques de l'indice préfigurant du danger. Dans les situations couvertes et ouvertes, la proximité peut donc être modulée en agissant sur les caractéristiques de l'indice : statique ou potentiellement mobile dans le cas des situations couvertes ; statique ou mobile dans le cas des situations ouvertes. La revue de la littérature montre une seconde façon de moduler cette similarité de surface, en modifiant le côté d'apparition du danger : gauche ou droite (R. W. Allen et al., 2011; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010).

9.1.2 Modalités de rétroactions formatives pour favoriser l'apprentissage des compétences

L'efficacité relative des rétroactions formatives est une question centrale des travaux sur l'apprentissage, en particulier en simulateur. La littérature montre que les rétroactions formatives immédiates, spécifiques et élaborées sont les plus efficaces pour l'apprentissage des compétences de haut niveau (Diehl & Sterman, 1995; Shute, 2008; Van der Kleij et al., 2015; Wulf & Shea, 2004). Les rétroactions immédiates désignent des rétroactions fournies de façon concomitantes à la performance de l'apprenant, c'est-à-dire dans les instants qui suivent la rencontre avec l'événement ou la difficulté dans la situation d'apprentissage (Van der Kleij et al., 2015). Une rétroaction est spécifique et élaborée lorsqu'elle signale de façon explicite à l'apprenant les caractéristiques du problème à résoudre dans la situation, tout en lui fournissant des explications précises sur la façon de le résoudre (Bangert-Drowns et al., 1991; Burkhardt, Cabon, et al., 2016).

Par ailleurs, deux types de rétroactions peuvent être distinguées compte tenu du rapport qu'elles entretiennent vis-à-vis de la narration de la situation d'apprentissage. Les rétroactions intradiégétiques appartiennent à la narration de l'univers dans lequel se déroule l'apprentissage (Cecchi, 2010; Salomoni et al., 2017; Souriau & Souriau, 1990). Elles sont retrouvées dans l'approche « par erreur » utilisée dans les formations usant du simulateur à des fins d'exposition des apprenants à des situations critiques. L'approche « par erreur passive » est la plus courante. Elle désigne des situations d'apprentissage confrontant l'apprenant à des situations contenant un danger qu'il doit impérativement éviter. S'il reste passif, c'est-à-dire s'il n'agit pas dans la situation, un accident ou un presque accident (la rétroaction) survient invariablement. L'approche « par erreur » active n'a été utilisée que par une seule étude à notre connaissance (Ivancic & Hesketh, 2000). Dans cette approche, c'est le conducteur par son action inadaptée qui est susceptible de provoquer un danger dans une situation à priori non risquée.

Dans ce cadre, la rétroaction intradiégétique est constituée de l'impact négatif de la situation sur le conducteur, en termes d'accidentalité, de risque ou de difficulté perçue. En ce sens, elle pourrait se rapprocher des situations critiques d'apprentissage rencontrées durant les premiers temps de la conduite autonome. En effet, elle placerait les conducteurs dans un cadre similaire à celui de l'expérience de situations critiques pour l'apprentissage, observé dans l'étude 1. Entraîné par une approche « par erreur » active, les conducteurs démontrent moins de comportement d'erreur sur des situations similaires ou proche (Ivancic & Hesketh, 2000). De même, les conducteurs entraînés par une approche « par erreur » passive démontrent de meilleures compétences de détection visuelle des dangers et ralentissent leur allure significativement plus précocement à l'approche d'une zone de danger potentiel (Vlakveld et

al., 2011; Wang et al., 2010). Cependant, l'efficacité réelle de ces rétroactions reste mal connue et elles présentent plusieurs limites. Notamment, elles sont difficiles à standardiser, peu systématiques et difficiles à interpréter par les apprenants (Hirsch & Bellavance, 2017; Kuiken & Twisk, 2001).

Au contraire, les rétroactions extradiégétiques n'appartiennent pas à la narration de l'univers dans lequel se déroule l'apprentissage. En conduite simulée, il s'agirait par exemple d'un message affiché au centre de l'écran du simulateur au moment du danger potentiel, indiquant la nature du danger présent et la marche à suivre pour l'éviter. Elles ont pour avantage de proposer une bonne spécificité et élaboration, au contraire des rétroactions intradiégétiques. De nombreux programmes d'entraînement proposent des rétroactions extradiégétiques, et ces dernières s'avèrent efficaces pour favoriser l'apprentissage des compétences de conduite perceptives et cognitives. Toutefois, ces rétroactions sont fournies au conducteur de manière différée, usuellement en complément d'une rétroaction intradiégétique « par erreur passive » (R. W. Allen et al., 2011; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010).

A notre connaissance, aucune étude ne teste l'effet d'une rétroaction extradiégétique immédiate pour l'entraînement des compétences perceptives et cognitives de conduite. Pourtant, ces rétroactions possèdent potentiellement tous les attributs en termes de spécificité, élaboration et temporalité pour être efficaces pour l'apprentissage (Shute, 2008; Van der Kleij et al., 2015). Par ailleurs, au contraire de l'approche « par erreur » active, l'efficacité des rétroactions formatives intradiégétiques « par erreur » passive n'a jamais été testée de façon isolée, c'est-à-dire séparé d'une rétroaction extradiégétique supplémentaire différée. Un intérêt supplémentaire est donc d'évaluer les conséquences d'une erreur passive dans une situation critique à la sévérité importante (i.e. avec un risque élevé d'accident ; Burkhardt, Corneloup, et al., 2016), sur l'apprentissage des compétences perceptives et cognitives en réalité virtuelle.

9.1.3 Hypothèses

Cette étude compare des conducteurs entraînés et non entraînés, comme cela est fréquemment le cas dans la littérature (voir par exemple Allen et al., 2011; Ivancic & Hesketh, 2000; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010).

Nous faisons l'hypothèse que les conducteurs entraînés (intradiégétique et extradiégétique) devraient présenter de meilleures performances que les conducteurs non entraînés.

Concernant l'efficacité relative des modalités de rétroaction, il paraît délicat de poser une hypothèse ferme sur la supériorité de l'approche extradiégétique sur l'approche intradiégétique, ou vice versa. Nous faisons également l'hypothèse que le transfert des apprentissages sera plus important sur les situations similaires et proches que sur les situations lointaines.

9.2 Matériel et méthode

9.2.1 Plan expérimental

Deux modalités de rétroactions sont présentées à des conducteurs novices, en plus d'une modalité contrôle (facteur Rétroactions : intradiégétique / extradiégétique / contrôle → R3).

L'effet de l'entraînement est évalué sur trois types de situations test (facteur situation : similaires, proches, lointaines → Sc3). Tous les participants passent tous les situations tests.

9.2.2 Participants

Soixante-douze conducteurs novices ont été recrutés par annonce sur internet et étaient rémunérés 20 euros pour leur participation (38 hommes, 34 femmes ; âge moyen = 23,5 ans ; ETY = 3 ans ; min = 18 ans ; max = 32 ans). Ils étaient présélectionnés par un questionnaire d'inclusion comportant des questions socio-démographiques et d'habitude de conduite (voir annexe). Pour être admis à passer l'étude, les conducteurs devaient être âgés de moins de 30 ans, avoir le permis depuis moins de 2 années OU conduire moins de 1 à 2 fois par semaine.

Les participants admis étaient invités à se rendre sur le site IFSTTAR de Marne la Vallée afin d'y passer le protocole expérimental. Au cours de ce protocole, un second questionnaire déterminait l'inclusion des participants dans l'analyse finale des résultats de l'étude (voir annexes). Ces critères étaient les suivants : le temps écoulé depuis l'obtention du permis de conduire (avoir le permis de conduire depuis moins de 3 ans (Government Queensland, 2005; B. Simons-Morton & Ehsani, 2016) et/ou le nombre de kilomètres auto-déclaré depuis son obtention (i.e. avoir parcouru moins de 15 000 km (Seacrist et al., 2018)). En effet, le seul temps passé depuis l'obtention du permis de conduire n'est pas automatiquement représentatif de l'expérience de conduite. Ainsi, des conducteurs ayant obtenu le permis depuis peu de temps peuvent conduire de manière très régulière et rencontrer une grande diversité de situation. De même, des conducteurs ayant obtenu le permis depuis longtemps peuvent avoir peu conduit depuis le passage de l'examen.

Sur la base de ces deux critères, 11 conducteurs parmi les 72 recrutés ont été exclus de l'expérimentation. La population finale regroupe ainsi 61 conducteurs (33 hommes, 28 femmes ; âge moyen = 22,9 ans, médiane = 22,5 ans ; nombre moyen de km parcourus déclaré = 4369km, médiane = 2500km). Ces 61 participants sont répartis aléatoirement et équitablement dans les trois modalités de rétroactions dispensées.

9.2.3 Matériel

9.2.3.1 Simulateur

Un Mini Simulateur HDR (*high dynamic range*) basse fidélité à base fixe est utilisé (voir figure 44). Il est composé de 3 écrans haute-définition, proposant 120° d'exploration visuelle sur la situation de conduite, d'un pédalier et d'un volant. Il permet au conducteur de se déplacer dans un environnement virtuel plus réaliste photométriquement grâce à l'utilisation d'un écran HDR (*high dynamic range*), permettant une gamme de luminances et de contrastes plus élevée que les systèmes classiques d'affichage.



Figure 44, photographie du simulateur à base fixe HDR utilisé pour l'expérimentation

9.2.3.2 Circuits et situations

Trois circuits expérimentaux sont utilisés pour l'expérimentation. Le premier circuit est un circuit de familiarisation. Il permet aux participants de s'habituer à la conduite en simulateur. Le second circuit est un circuit d'entraînement. Il présente les 2 situations d'apprentissage ouverte-graduelle et couverte. Le troisième circuit est un circuit test. Tous les circuits comprennent strictement les mêmes configurations routières. Seul le décor et l'enchaînement des configurations changent en fonction du circuit pour éviter tout effet d'habituation (Vlakveld et al., 2011). Le temps de parcours du circuit d'entraînement et du circuit test est d'environ 10 minutes, pour une longueur totale d'environ 6 à 7 km chacun.

Deux situations d'apprentissage contenant chacun un danger potentiel différent sont présentées à chaque conducteur novice (voir tableau 29) : une situation ouverte et une situation couverte. Ces deux situations sont déclinées en trois versions, correspondant à chacune des conditions de rétroactions : une version avec rétroaction intradiégétique, une version avec rétroaction extradiégétique et une version contrôle sans rétroaction.

Dans la situation d'apprentissage ouverte le conducteur novice approche d'un croisement sur lequel il est prioritaire. Un autre conducteur est à l'arrêt à un stop sur la voie adjacente droite. Dans la condition contrôle, l'autre usager ne démarre pas et aucun message ne s'affiche sur l'écran du conducteur. Dans la version intradiégétique, l'autre usager démarre inopinément à l'approche du conducteur, lui refusant la priorité (danger). L'action de l'autre véhicule était programmée pour être difficilement évitable par les conducteurs. Toutefois, la survenue d'un accident était évitée car l'autre véhicule s'arrêtait toujours à temps pour éviter une collision. Dans la version extradiégétique, l'autre usager ne démarre pas, la simulation se

fige et affiche le message textuel suivant au centre de l'écran « si le conducteur n'avait pas respecté la signalisation, sans action de votre part, la collision aurait été difficilement évitable ». Ce message est constitué de deux éléments. Le premier attire l'attention du conducteur sur le danger potentiel de la situation. Le second élément informe le conducteur de la nécessité d'amorcer une action pour éviter le danger potentiel le cas échéant.

Dans la situation d'apprentissage couverte, le conducteur novice approche d'un passage piéton, dont le côté droit est dissimulé en partie par un camion. Dans la condition contrôle, aucun piéton n'est présent et aucun message ne s'affiche sur l'écran du conducteur. Dans la version intradiégétique, un piéton surgit de l'arrière du camion (danger). L'action du piéton était programmée pour être difficilement évitable par les conducteurs. Néanmoins, le piéton s'arrêtait toujours à temps pour éviter une collision avec le conducteur. Dans la version extradiégétique, le piéton ne traverse pas, la simulation se fige et affiche le message textuel suivant au centre de l'écran : « si le piéton avait traversé, sans action de votre part, la collision aurait été difficilement évitable ». Ce message est constitué des deux mêmes éléments décrit précédemment.

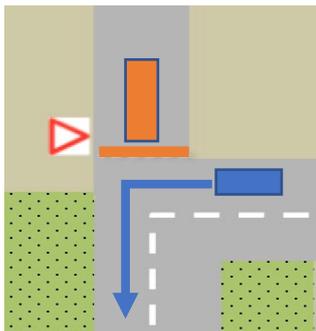
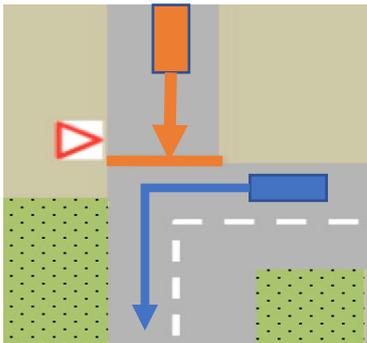
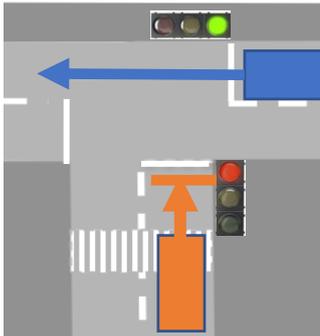
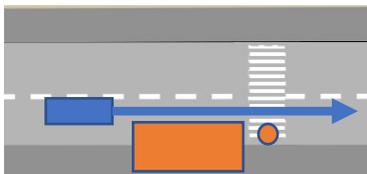
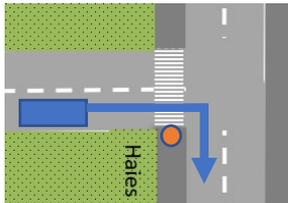
Tableau 29, situations utilisées pour l'entraînement des compétences

Situations d'entraînement Ouvertes		
Rétroaction intradiégétique	Rétroaction extradiégétique	Rétroaction contrôle
<ul style="list-style-type: none"> À l'approche du conducteur, la voiture (rouge) qui est à l'arrêt au stop s'engage La voiture (rouge) évite la collision, elle s'arrête au dernier moment avant de toucher le conducteur 	<ul style="list-style-type: none"> À l'approche du conducteur, la voiture (rouge) qui est à l'arrêt au stop ne s'engage pas La simulation se bloque et le message textuel apparaît (et reste affiché pendant 5 secondes) 	<ul style="list-style-type: none"> La voiture reste à l'arrêt au stop, clignotant allumé et ne s'engage pas
Situations d'entraînement Couvertes		
Rétroaction intradiégétique	Rétroaction extradiégétique	Rétroaction contrôle
<ul style="list-style-type: none"> À l'approche du conducteur, le piéton traverse derrière le camion Le piéton évite la collision, il s'arrête au dernier moment avant de toucher la voiture 	<ul style="list-style-type: none"> À l'approche du conducteur, le piéton ne traverse pas La simulation se bloque et le message textuel suivant apparaît (et reste affiché pendant 5 secondes) 	<ul style="list-style-type: none"> À l'approche du conducteur, le piéton ne traverse pas

Dans les situations test, le danger potentiel ne se matérialise pas. Ainsi, dans les situations couvertes le piéton ne traverse pas la route, et dans les situations test ouvertes l'autre véhicule ne coupe pas la trajectoire du conducteur. Cette absence de danger est nécessaire pour éviter un effet d'entraînement supplémentaire (Vlakveld et al., 2011). Par ailleurs, l'ordre de passation des situation test sur le circuit test est pseudo randomisé afin que les types de situations évaluées et de configurations utilisées ne se répètent pas.

Trois situations tests sont mis en place pour chacune des situations d'apprentissage : une situation similaire, une situation proche et une situation lointaine (voir tableau 30). **Les situations similaires** présentent une répétition stricte de la situation d'entraînement. La configuration routière et le danger potentiel y sont exactement les mêmes. **Les situations proches** présentent une configuration routière identique à la situation d'entraînement, néanmoins un trait de surface de la situation change. Dans la situation test ouverte « proche », au lieu d'être à l'arrêt, l'autre véhicule est en mouvement avant d'arriver au cédez le passage. Dans la situation de test couverte, c'est un autre élément mobile : un bus, qui cache un piéton sur la voie de gauche. **Les situations lointaines** présentent des traits de surface encore plus éloignés de la situation d'entraînement. Dans la situation ouverte lointaine, non seulement l'autre véhicule est en mouvement, mais il arrive en plus de la gauche, où il doit s'arrêter à un feu rouge avant de couper la croute du conducteur. La situation couverte lointaine correspond à la situation de test « haie » de l'étude 2. Le danger y arrive bien de la droite, mais est caché par un élément statique de l'environnement (une haie). Cette situation a été choisie comme situation lointaine car dans l'étude 2, les performances des novices y étaient bien inférieures à celle des expérimentés.

Tableau 30, situations tests utilisées pour évaluer les compétences

Situations test similaire	Situations test proches	Situations test lointaines
<u>Situations tests Ouvertes</u>		
		
<u>Situations tests Couvertes</u>		
		

9.2.3.3 Questionnaire d'inclusion et questionnaire de renseignement démographiques et d'habitude de conduite

Le questionnaire d'inclusion comprend des questions concernant l'âge et la date d'obtention du permis de conduire (voir annexes). Les potentiels participants ayant plus de 30 ans ne sont pas retenus. Les habitudes de conduite étaient évaluées sur la base du nombre de fois où le participant utilisait la voiture par semaine.

Les participants sélectionnés passent un second questionnaire comprenant des questions de renseignements sociodémographiques et sur leurs habitudes de conduite (voir annexes). Les renseignements sociodémographiques comprennent l'âge, le lieu de résidence (urbain, péri-urbain, campagne) et la catégorie socio-professionnelle. Les renseignements d'habitudes de conduite comprennent notamment l'activité de conduite (date d'obtention du permis, pratique de la conduite accompagnée) et l'évaluation du kilométrage moyen effectué par semaine, par mois et par an. Par manque de temps, l'ensemble des données n'a pu être traité. Les résultats du questionnaire ont été utilisés pour l'inclusion définitive des conducteurs dans l'étude.

9.2.4 Procédure

La présélection des participants se fait en ligne à l'aide du questionnaire d'inclusion. Les candidats retenus sont ensuite invités à venir sur le site IFSTTAR de Satory (78) pour réaliser l'expérience.

A leur arrivée, les participants sont informés brièvement des objectifs de l'étude et des consignes de sécurité inhérentes à la conduite sur simulateur. Ils signent un formulaire de consentement libre et éclairé de participation à l'étude avant de prendre place sur le simulateur pour un circuit d'entraînement similaire à celui de l'étude 2. Le participant profite de ce circuit de familiarisation pour régler la distance du siège à sa convenance. Il est ensuite affecté aléatoirement à l'une des trois conditions de rétroactions.

Après avoir effectué le circuit de familiarisation, le participant passe directement au circuit d'entraînement. Il recevait pour consigne de conduire normalement, en respectant les limitations de vitesse comme si il allait à un rendez-vous auquel il n'était ni en retard, ni en avance. Il était guidé par des instructions auditives, simulant un guidage vocal par GPS. Après avoir terminé l'entraînement, le participant remplit le questionnaire de renseignement socio-démographique et d'habitude de conduite. Remplir ces questionnaires requiert environ 10 à 20 minutes pour le participant, ce qui prévient tout effet de récence qui aurait pu apparaître si le participant avait enchaîné directement le circuit test.

Enfin, tous les participants conduisent sur le même circuit test, comprenant les mêmes situations test. A la fin de l'entraînement, les participants étaient remerciés et l'objectif précis de l'étude leur était révélé si ils le souhaitaient.

9.2.5 Données recueillies

L'ensemble des informations présentées dans cette partie peut être retrouvé de façon détaillée dans la figure 45 et le tableau 31. L'approche et les arguments pour le choix des indicateurs sont discutés à la suite.

9.2.5.1 Fenêtre d'observation des données

L'analyse de l'ensemble des indicateurs, y compris des variations de vitesse commence à partir de 150 mètres avant le lieu du danger potentiel. L'analyse se termine lorsque le conducteur a dépassé le lieu du danger potentiel. Une base de distance en mètres est utilisée ici car elle permet aisément la comparaison inter-groupes, dans des situations où aucun événement ne se déclenche.

Les données de vitesse étant enregistrées de manière continue (50Hz), une discrétisation est effectuée pour faciliter les analyses (Crundall et al., 2012). Cette discrétisation consiste à calculer la vitesse moyenne par phase de 10m, pour un total de 15 phases (Px ; voir figure 45).

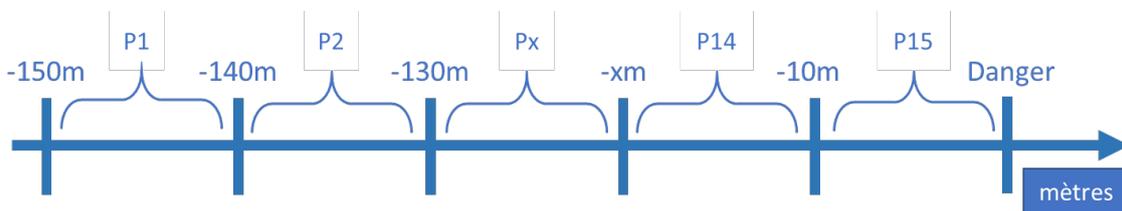


Figure 45, fenêtre temporelle d'observation des variations de vitesse

9.2.5.2 Indicateurs

A partir de 150m avant l'arrivée au danger, nous mesurons la distance en mètre entre les comportements de freinage et de décélération des conducteurs et le lieu du danger. Les méthodes de calcul précises de ces indicateurs sont détaillées dans le tableau 31. Trois indicateurs basés sur les freinages sont retenus : La distance entre le dernier freinage et le lieu du danger potentiel (en m), la durée totale du freinage, le nombre total de freinage. Un indicateur basé sur les comportements de décélération est retenu. Il s'agit de la distance entre la dernière décélération et le lieu du danger potentiel. En effet, un ralentissement de l'allure peut également passer par un relâchement de la pédale d'accélérateur, sans pour autant avoir recours à la pédale de frein. Ces indicateurs visent à identifier ce type de comportement. Enfin, un dernier indicateur combine les comportements de freinages et de décélération pour préciser davantage les procédures utilisées par les conducteurs afin d'anticiper la survenue d'un danger potentiel. Il s'agit de la distance entre la dernière décélération et le premier freinage.

Les caractéristiques des indicateurs de freinage, sont identifiées sur la base des mesures au niveau de la pédale de frein. Il n'existe pas de règle claire pour l'identification des comportements de freinage (P. Green, 2013). Dans le cadre du simulateur utilisé, les participants pouvaient enfoncer la pédale frein pour un maximum de 100 crans. On considère alors comme freinage significatif toute augmentation de la pression sur la pédale de frein supérieure à 25% de la moyenne des intensités de freinage de la fenêtre précédente. Ce score est inférieur au score de 33% sélectionné pour l'étude 2. Une valeur plus faible a été choisie pour compenser les différences entre les situations test proposées dans les deux études. En effet, dans l'étude 2, un danger se matérialisait à chaque situation test. Ce n'est pas le cas dans les situations test de cette étude. De plus, dans le cadre de l'étude 2, les différences expérimentés/novices en termes de comportements de freinage adviennent majoritairement après l'apparition du danger.

Les caractéristiques des indicateurs de décélération sont identifiées sur la base des mesures de pression au niveau de la pédale d'accélérateur. A l'instar des comportements de freinage, il n'existe pas de règle claire présidant à l'identification des décélérations (P. Green, 2013). Dans le simulateur utilisé, les participants pouvaient enfoncer la pédale d'accélérateur pour un maximum de 100 crans. Pour identifier un comportement de décélération, nous avons choisi de considérer tout relâchement de la pression sur la pédale d'accélération qui atteint finalement une valeur inférieure à 10% du total de l'appui possible. Ces indicateurs ont été ajoutés car dans l'étude 2 des différences intergroupes en termes de variations de vitesse au cours de la situation ne sont pas constatées. Par conséquent, ces indicateurs permettraient de détecter des comportements anticipatoires de ralentissement à l'approche de situations potentiellement dangereuse.

Des distances sont alors calculées sur la base des indicateurs bruts de freinage et de décélération. Chaque distance exprime l'écart en mètres entre la présence d'un ou d'une succession de comportements d'intérêts (freinage et/ou décélération), et l'endroit d'apparition potentielle du danger.

Les caractéristiques des variations de vitesse sont analysées à partir d'un coefficient d'accélération relatif similaire à celui utilisé dans l'étude 2. Il a pour objectif de mesurer la perte ou le gain de vitesse de chaque conducteur, par rapport à sa vitesse initiale. Une telle approche permet de tenir compte des éventuelles différences de vitesse absolue entre les participants. Pour calculer le coefficient d'accélération relatif, la vitesse moyenne calculée (V_{mx}) pour chaque tranche de 10m (x) est rapportée à la vitesse initiale (V_i). La vitesse initiale correspond à la vitesse instantanée 150m avant l'apparition du danger. Le coefficient d'accélération relatif peut être résumé par la formule suivante : $(V_{mPx} / V_i) - 1$.

Tableau 31, indicateurs utilisés pour les situations test, avec méthodes de calcul

Compétence mesurée	Indicateurs	Indicateurs bruts	Données brutes	Méthodes de calcul
Anticipation <u>Prise de décision tactique</u>	Distance dernier freinage lieu du danger potentiel	Freinages (fréquence de codage : 10Hz) : 1 freinage = 1 Appui sur la pédale > 25% de la moyenne des appuis de la fenêtre temporelle précédente	Données issues du simulateur – Pédalier – pédale de frein (fréquence d'enregistrement : 50hz – 0 à 100 crans d'appui possible)	<i>Distance dernier freinage (en m) – 150</i>
	Durée freinage			<i>Durée totale du freinage (en s)</i>
	Nombre freinage			<i>Nombre de freinage</i>
	Distance dernière décélération lieu du danger potentiel	Décélérations (fréquence de codage : 10Hz) : 1 décélération = 1 relâchement de la pédale > 10% du total possible	Données issues du simulateur – Pédalier – pédale d'accélérateur (fréquence d'enregistrement : 50hz – 0 à 100 crans d'appui possible)	<i>Distance dernière décélération (en m) – 150</i>
	Distance dernière décélération – dernier freinage avant le lieu du danger	Freinages (fréquence de codage : 10Hz) Décélérations (fréquence de codage : 10Hz)	Données issues du simulateur – Pédalier – pédale de frein Pédalier – pédale d'accélérateur	<i>Distance (dernière décélération → dernier freinage)</i>
	Ralentissements – coefficient accélération relatif	Vitesse moyenne par phase de 10m (soit 15 phases au total) : $VmPx$ Vitesse initiale ($V_{initiale}$)	Vitesse instantanée (V_i ; fréquence d'enregistrement : 50hz, 150m avant le lieu du danger potentiel)	$\frac{VmPx}{V_{initiale}} - 1$

9.2.6 Analyses statistiques, tests et comparaisons effectués

L'ensemble des analyses est effectué par situation indépendante, du fait de leur configuration différente (ouvertes/couvertes), susceptibles d'affecter le comportement des conducteurs, indépendamment de tout effet d'apprentissage.

Les analyses des indicateurs de freinages et de décélération s'effectuent par situation indépendante en 3 étapes. Des analyses de variances (ANOVA) 3x1 (type d'entraînement x indicateur) comparent les effets du type de rétroaction pour chacun des indicateurs. Lorsqu'un effet du protocole d'entraînement est observé, en accord avec nos questions de recherche et nos hypothèses, des contrastes planifiés sont conduits pour identifier les caractéristiques des différences entre conducteurs entraînés et conducteur non entraînés, ainsi qu'entre les différentes modalités de rétroactions dispensées. Par ailleurs, des analyses Post-hoc (HSD de Tukey) sont pratiquées pour explorer par catégories les effets des protocoles d'apprentissage.

Les analyses des variations de vitesse consistent en 15 ANOVA 3x1 (Type d'entraînement X coefficient d'accélération relatif) indépendantes. Elles comparent pour chaque phase de 10m, l'effet du type de rétroactions dispensé sur les coefficients d'accélération relatifs des conducteurs. Lorsqu'un effet de l'entraînement est observé, des contrastes en accord avec nos hypothèses sont pratiqués pour en identifier les caractéristiques. Par ailleurs, des analyses Post-hoc (HSD de Tukey) sont pratiquées pour explorer catégories par catégories les effets des protocoles d'apprentissage.

9.3 Résultats

Les résultats sont présentés en trois parties, une par type de situation test (identique, analogique, adaptée). A l'intérieur de chaque partie, les analyses intergroupes concernant les variations de vitesse sont d'abord présentées, puis les différences observées lors de ces analyses sont précisées par les analyses intergroupes concernant les indicateurs. Compte tenu du grand nombre d'analyse, par souci de clarté, seuls les résultats exposant des différences significatives sont rapportés dans chaque partie.

Avant cela, pour contrôler d'éventuelles différences inter conducteurs, nous exposons les analyses concernant les différences de vitesses initiales. Puis, nous proposons une vue générale des variations de vitesse recueillies dans l'ensemble des situations test.

9.3.1 Différences de vitesses initiales et vue générale des variations de vitesse

On ne peut pas conclure à des différences significatives de vitesses initiales entre les différents types de rétroactions, sur aucune des situations test (voir tableau 32). Toutefois, l'analyse des courbes de vitesse montre que les conducteurs ayant reçus l'entraînement extradiégétique ralentissent plus tôt que les autres conducteurs, sur les scénarios similaires et proches de la situation d'entraînement (voir figure 46).

Tableau 32, vitesses initiales (en km/h) par type de rétroaction reçu, avec tests d'inférences sur la différence

		Extradiégétique		Intradiégétique		Non-entraînés		Test
		Vitesse	Ety	Vitesse	Ety	Vitesse	Ety	
Similaires	Ouverte	49,1	4,1	51,7	2,7	48,4	4,8	F (2, 58) = 2,5 ; p = 0,08
	Couverte	49,3	4,8	49	3,5	48,4	5	F (2, 58) = 0,21 ; p = 0,8
Proches	Ouverte	49,4	3,7	50,5	3,4	49,8	2,6	F (2, 58) = 0,57 ; p = 0,56
	Couverte	49,7	3,4	51,25	3,7	49,6	2,9	F (2, 58) = 1,53 ; p = 0,22
Lointaines	Ouverte	49,4	3,7	50,5	3	49,8	2,5	F (2, 58) = 0,7 ; p = 0,5
	Couverte	41,7	8,2	43,4	8,5	42,3	6,1	F (2, 58) = 0,24 ; p = 0,78

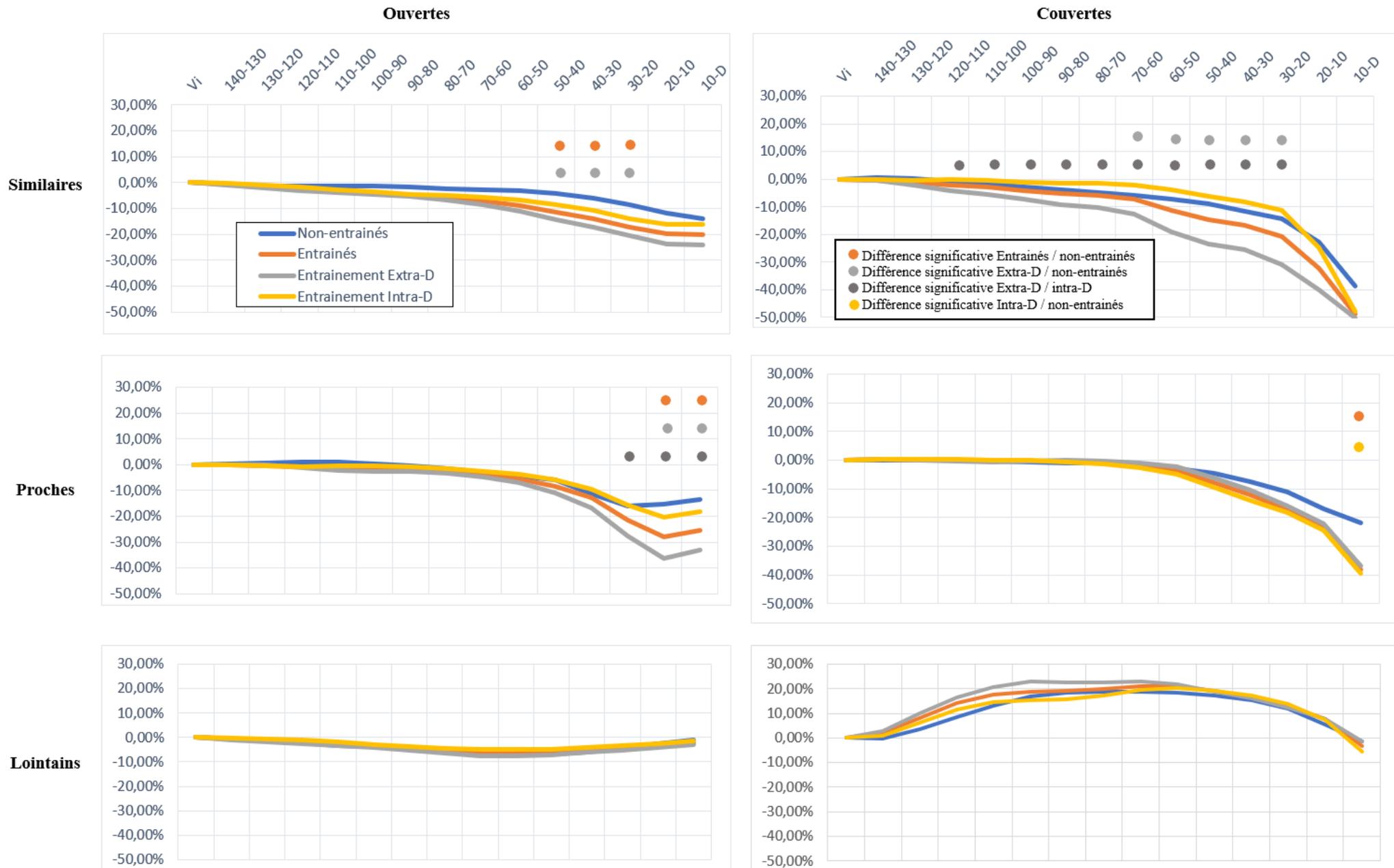


Figure 46, vue d'ensemble des Coefficients d'accélération relatifs identifiés dans les scénarios test, avec différences significatives inter-types de rétroactions

9.3.2 Les rétroactions extradiégétiques s'accompagnent d'un transfert plus important sur les situations similaires

9.3.2.1 Situation test ouverte

Un effet principal de l'entraînement sur le **coefficient d'accélération relatif** est constaté à partir de 50 mètres avant le lieu du danger potentiel (voir figure 48). A cette distance, les conducteurs entraînés ont significativement plus ralenti que les conducteurs non entraînés. Cette différence tend à s'estomper à partir de 20 mètres avant le danger. Par ailleurs, les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses ne permettent pas de conclure à une différence significative entre les deux types d'entraînement. Néanmoins, les tests post-hocs mettent en évidence que les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique ont significativement plus ralenti entre 50 et 20 mètres du danger que les conducteurs non entraînés. Une telle différence n'est pas observée pour les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique.

Un effet principal du type de rétroaction est constaté sur la **distance entre le dernier freinage et le lieu du danger** ($F(2,58) = 5,4$; $p = 0,006 < 0,01$). Les conducteurs entraînés freinent 13,5m plus tôt que les conducteurs non entraînés ($F(1,58) = 3,5$; $p = 0,06$), ce qui n'est pas généralisable. Toutefois, les contrastes révèlent que les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique freinent 22m plus tôt que les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique ($F(1,58) = 7,25$; $p = 0,009 < 0,01$; voir figure 48). Les analyses exploratoires post-hoc (HSD de Tukey) révèlent que les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique freinent 24,7m plus tôt que les conducteurs non entraînés ($p = 0,01 < 0,05$; voir figure 47). Or, on ne peut pas conclure à une différence significative d'écart de freinage entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés ($p = 0,94$).

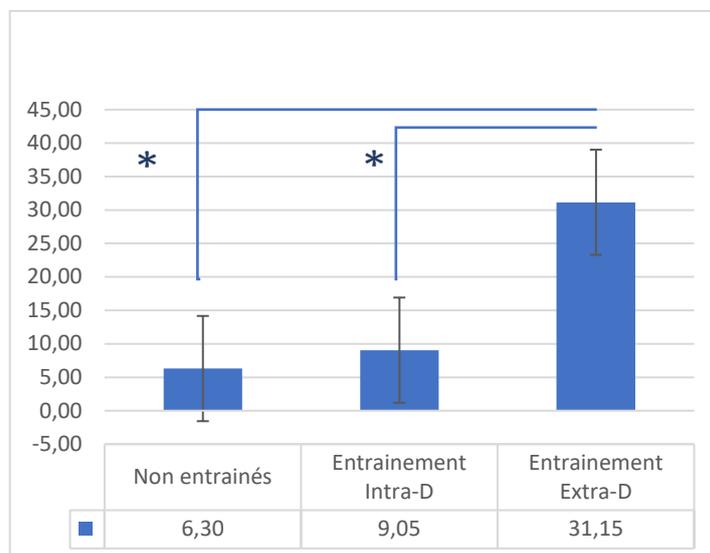
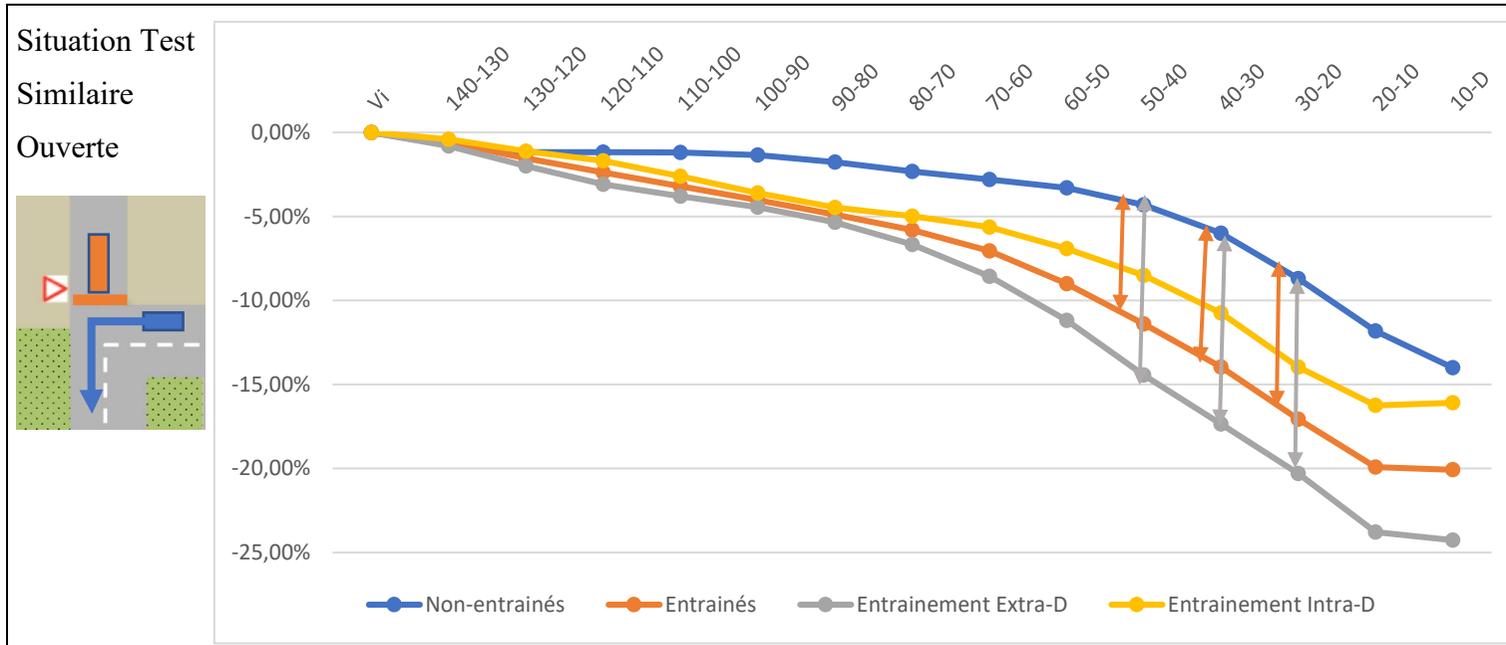


Figure 47, distances (en m) entre le dernier freinage et le lieu du danger, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$



Différences	Phase	Vi	140-130	130-120	120-110	110-100	100-90	90-80	80-70	70-60	60-50	50-40	40-30	30-20	20-10	10-D
Effet de l'entraînement (2,58) p=	F	2,5	0,33	0,56	1,2	1,3	1,2	1	0,95	1,4	2,6	3,7	4,4	4,1	3	3,1
	p=	0,08	0,715	0,57	0,30	0,28	0,306	0,368	0,39	0,24	0,08	0,029	0,016	0,021	0,056	0,051
Entraînés VS. Non entraînés (NE) Contrastes p=												7%	8%	8,3%		
												0,03	0,018	0,02		
Extra-D VS. Intra-D Contrastes p=												6%	6,5%	6%		
												0,11	0,08	0,11		
Extra-D VS. NE HSD p=												10%	11%	11%		
												0,02	0,01	0,01		
Intra-D VS. NE HSD p=												4%	4%	5%		
												0,49	0,42	0,39		

Figure 48, situation similaire ouverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale) ; les flèches oranges indiquent les différences significatives entre conducteurs entraînés et non entraînés ; les flèches grises indiquent les différences significatives entre conducteurs ayant reçu le protocole extradiégetique et les conducteurs de la non entraînés. Les différences sont données en valeur absolue

9.3.2.2 Situation couverte

Un effet de l'entraînement sur le **coefficient d'accélération relatif** est constaté entre 110 et 20 mètres avant le lieu danger potentiel (voir Figure 50). Les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses révèlent qu'entre 110 et 20 mètres avant le danger, les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique ont significativement plus ralenti que les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique. Les analyses exploratoires révèlent qu'entre 70 et 20m, les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique ont significativement plus ralenti que les conducteurs non entraînés. Une telle différence n'est pas observée entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés.

Un effet simple du type de rétroaction est constaté sur le **nombre total de freinage** ($F(2,58) = 3,4$; $p = 0,04 < 0,05$). Les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique freinent en moyenne 0,5 fois de plus que les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique. Néanmoins, la différence de 0,5 freinage constatée n'est pas significative ($F(1, 58) = 7,8$; $p = 0,057$; voir figure 49). Des analyses exploratoires post-hoc (HSD de Tukey) révèlent les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique freinent 0,6 fois de plus que les conducteurs non entraînés ($p = 0,04 < 0,05$; voir figure 50). On ne peut pas conclure à une telle différence entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés (différence = 0,11 ; $p = 0,83$; voir figure 50).

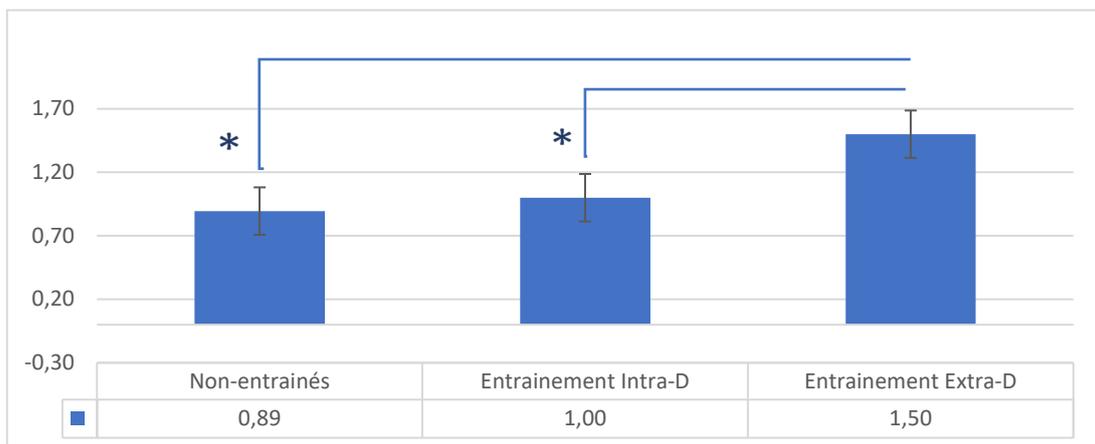


Figure 49, nombre de freinage moyen par groupe de conducteur, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$

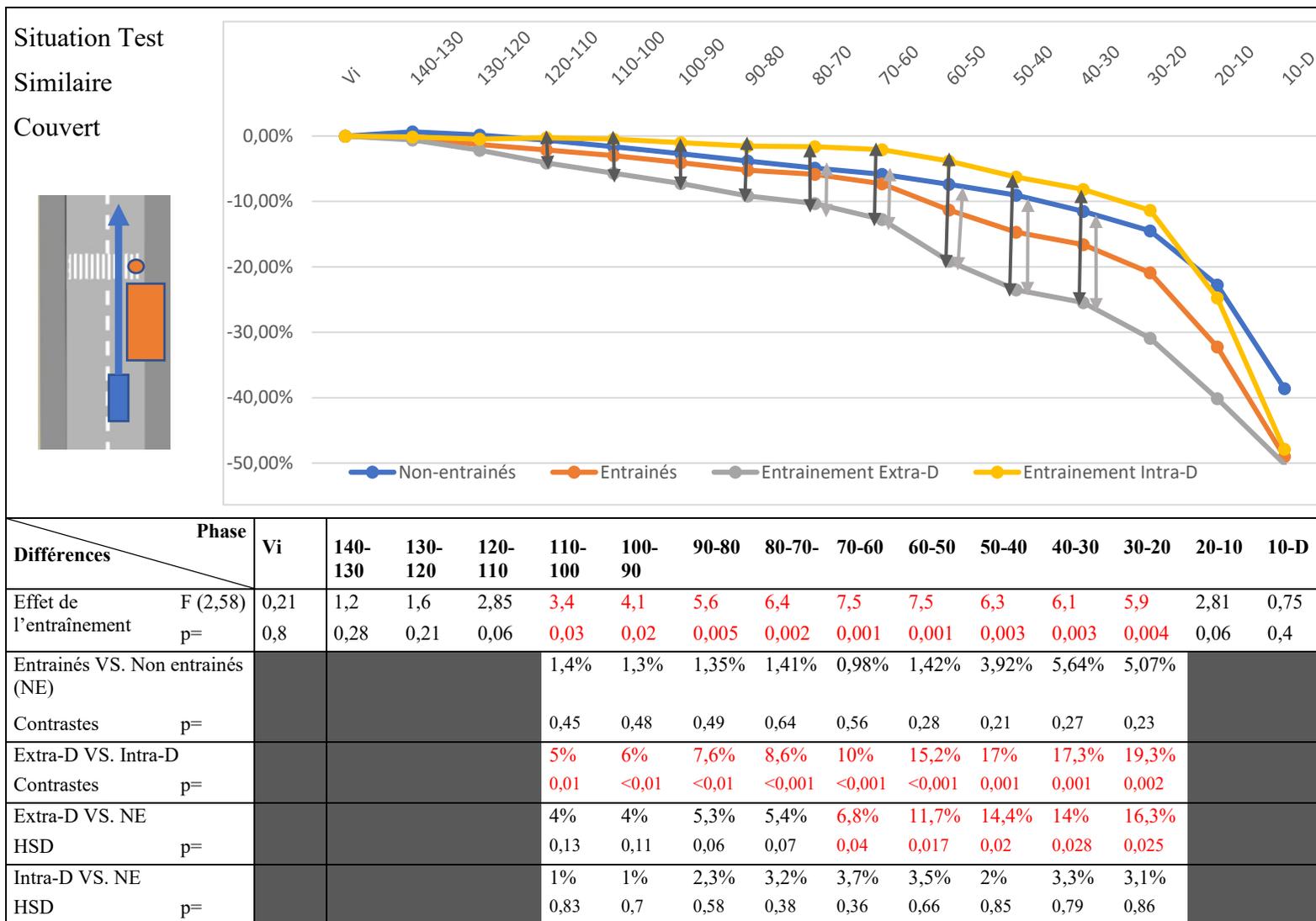


Figure 50, situation similaire ouverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale) ; Les flèches gris foncé indiquent les différences significatives entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et conducteur ayant reçu la rétroaction intradiégétique ; les flèches grises indiquent les différences significatives entre conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et les conducteurs non entraînés.

9.3.3 Les rétroactions extradiégétiques s'accompagnent d'un transfert plus important sur les situations proches

9.3.3.1 Situation ouverte

Un effet de l'entraînement sur le **coefficient d'accélération relatif** est constaté à partir de 30 mètres avant le lieu danger potentiel (voir Figure 54). Les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses indiquent qu'à partir de 30 mètres avant le danger, les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique ont significativement plus ralenti que les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique. Par ailleurs, à partir de 20 mètres avant le danger, les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique ont significativement plus ralenti que les conducteurs non entraînés. Or, on ne peut pas conclure à une telle différence significative entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés.

Un effet principal du type de rétroaction est constaté sur la **durée totale de freinage** ($F(2,58) = 5,56$; $p = 0,006 < 0,01$). Les conducteurs entraînés freinent en moyenne 0,7 secondes de plus que les conducteurs non entraînés (moyenne des entraînés = 1,3 secondes, ETY = 1,3 secondes ; moyenne non entraînés = 0,5 seconde, ETY = 0,9 seconde ; $F(1,58) = 5,3$; $p = 0,024 < 0,05$). De plus, les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique freinent en moyenne pendant 0,9 seconde de plus que les conducteurs entraînés avec la rétroaction intradiégétique (voir figure 51 ; $F(1,58) = 5,8$; $p = 0,02 < 0,05$). Par ailleurs, les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique freinent en moyenne 1,2 seconde de plus que les conducteurs non entraînés (HSD : $p = 0,006 < 0,01$). Or, on ne peut pas conclure à une telle différence significative entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés (HSD : $p = 0,68$).

Un effet principal du type de rétroaction est constaté sur la **distance entre le dernier appui sur la pédale d'accélérateur et le lieu du danger** ($F(2,58) = 3,3$; $p = 0,04 < 0,05$). Les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses indiquent que les conducteurs entraînés arrêtent d'accélérer 17m plus tôt que les conducteurs non entraînés (moyenne des entraînés = 56m du lieu du danger, ETY = 23m ; moyenne non entraînés = 39m, ETY = 33m ; $F(1,58) = 4,8$; $p = 0,03 < 0,05$). Les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses ne révèlent pas de différence entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et ceux ayant reçu la rétroaction intradiégétique ($F(1,58) = 1,9$; $p = 0,17$). Néanmoins, les analyses exploratoires post-hoc (HSD de Tukey) révèlent que les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique arrêtent d'accélérer 22m plus tôt que les conducteurs non entraînés ($p = 0,03 < 0,05$; voir figure 52). Or, on ne peut pas conclure à une telle différence significative entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés ($p = 0,42$).

Un effet principal du type de rétroaction est constaté sur **l'écart entre la dernière accélération et le premier freinage** ($F(2,58) = 3,5$; $p = 0,03 < 0,05$). Les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses indiquent que les conducteurs entraînés ont un écart de 9m plus important entre leur dernière accélération et leur dernier freinage avant le danger en comparaisons des conducteurs non entraînés (moyenne des entraînés = 16m, ETY = 17m ; moyenne non entraînés = 7m, ETY = 12m ; $F(1,58) = 4,5$; $p = 0,036 < 0,05$). Les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses ne révèlent pas de différence entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et ceux ayant reçu la rétroaction intradiégétique (voir figure 53 ; $F(1,58) = 2,4$; $p = 0,12$). Néanmoins, les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique ont un écart de 12,8m plus important entre leur dernière accélération et leur dernier freinage avant le danger que les conducteurs non entraînés ($p = 0,028 < 0,05$). Or, on ne peut pas conclure à une telle différence significative entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés ($p = 0,51$).

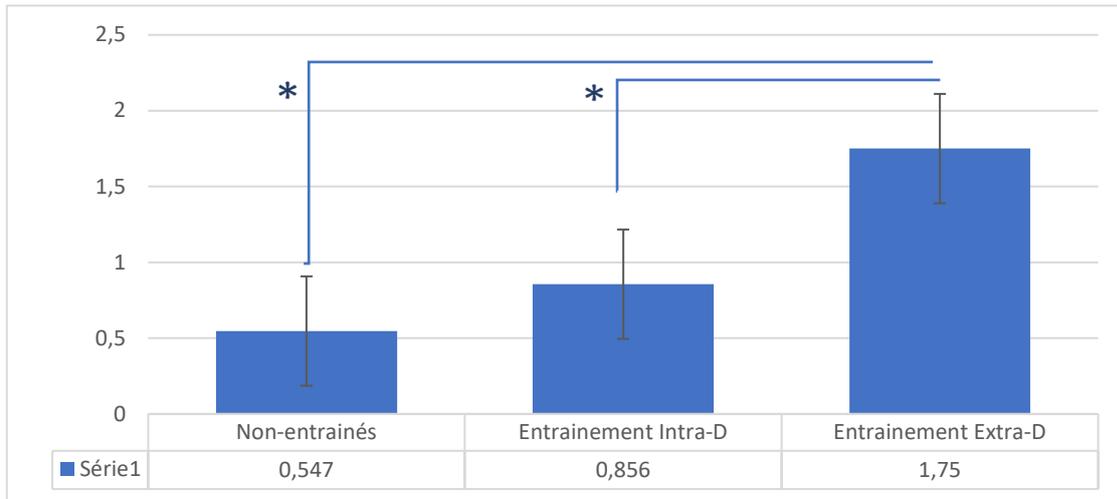


Figure 51, Durées de freinages moyens par groupe de conducteur, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$

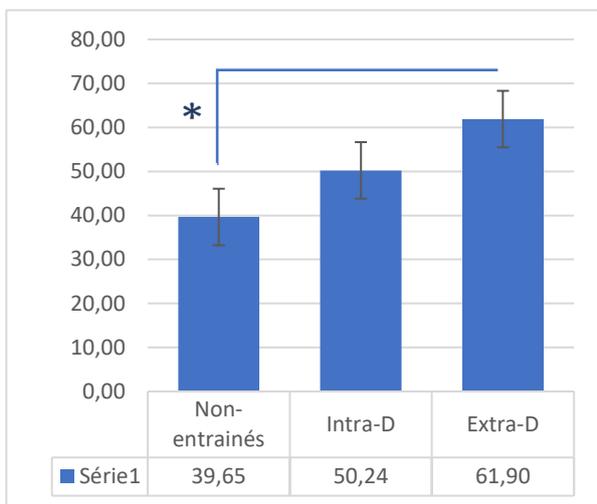


Figure 52, Distances (en m) entre le dernier appui sur la pédale d'accélérateur et le lieu du danger, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$

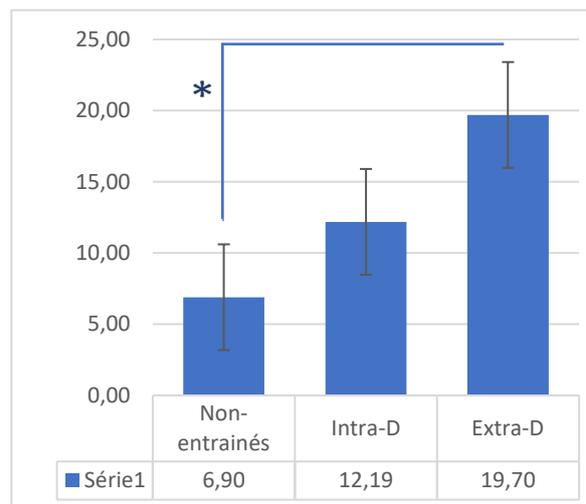
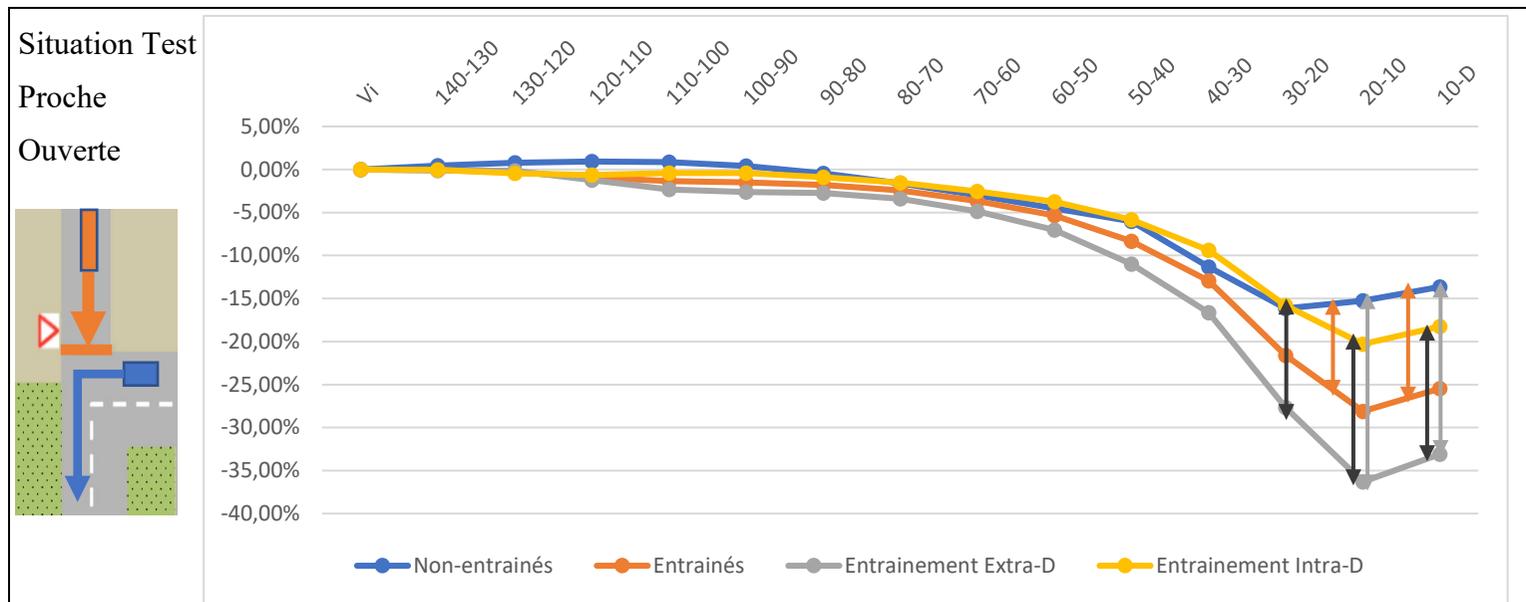


Figure 53, Distances (en m) entre la dernière accélération et le premier freinage, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$



	Phase	Vi	140-130	130-120	120-110	110-100	100-90	90-80	80-70	70-60	60-50	50-40	40-30	30-20	20-10	10-D
Différences	F (2,58)	0,57	1,7	1,47	1,3	1,3	1	0,7	0,5	0,57	0,98	1,9	1,8	3,2	6,0	5,9
	p=	0,56	0,19	0,23	0,27	0,27	0,35	0,5	0,6	0,57	0,38	0,15	0,17	0,04	0,004	0,004
Entraînés VS. Non entraînés (NE)														5,4%	15,3%	13,2%
Contrastes	p=													0,23	0,02	0,02
Extra-D VS. Intra-D														11,8%	16%	14,8%
Contrastes	p=													0,02	0,01	0,01
Extra-D VS. NE														11,5%	21%	19%
HSD	p=													0,08	0,004	0,004
Intra-D VS. NE														0%	5%	4,5%
HSD	p=													0,99	0,7	0,7

Figure 54, situation proche ouverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale) ; Les flèches jaunes indiquent les différences significatives entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et conducteur ayant reçu la rétroaction intradiégétique ; les flèches grises indiquent les différences significatives entre conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et les conducteurs non entraînés ; les flèches oranges indiquent les différences significatives entre conducteurs entraînés et non-entraînés.

9.3.3.2 Situation couverte

Un effet de l'entraînement sur le **coefficient d'accélération relatif** est constaté à partir de 10 mètres du lieu danger potentiel (voir figure 56). En particulier, à partir de 10 mètres du danger, les conducteurs entraînés ont significativement plus ralenti que les conducteurs non entraînés. Les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses ne permettent pas de conclure à une différence significative entre les deux types d'entraînement, bien que les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique aient significativement plus ralenti que les conducteurs non entraînés, 10m avant le lieu du danger potentiel.

Un effet principal du type de rétroaction est constaté sur la **durée totale de freinage** ($F(2,58) = 3,4$; $p = 0,039 < 0,05$). Les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses indiquent que les conducteurs entraînés freinent 0,9 seconde de plus que les conducteurs non entraînés (moyenne des entraînés = 1,6 secondes, $ETY = 1,6$ secondes ; moyenne non entraînés = 0,7 seconde, $ETY = 1,1$ seconde ; $F(1,58) = 4,9$; $p = 0,029 < 0,05$). Les contrastes pratiqués en accord avec nos hypothèses ne révèlent pas de différence entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et ceux ayant reçu la rétroaction intradiégétique ($F(1,58) = 1,89$; $p = 0,17$). Des analyses exploratoires post-hoc (HSD de Tukey) révèlent néanmoins que les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique freinent significativement plus longtemps que les conducteurs non entraînés ($p = 0,03 < 0,05$; voir figure 55). Or, on ne peut pas conclure à une telle différence significative entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés ($p = 0,41$).

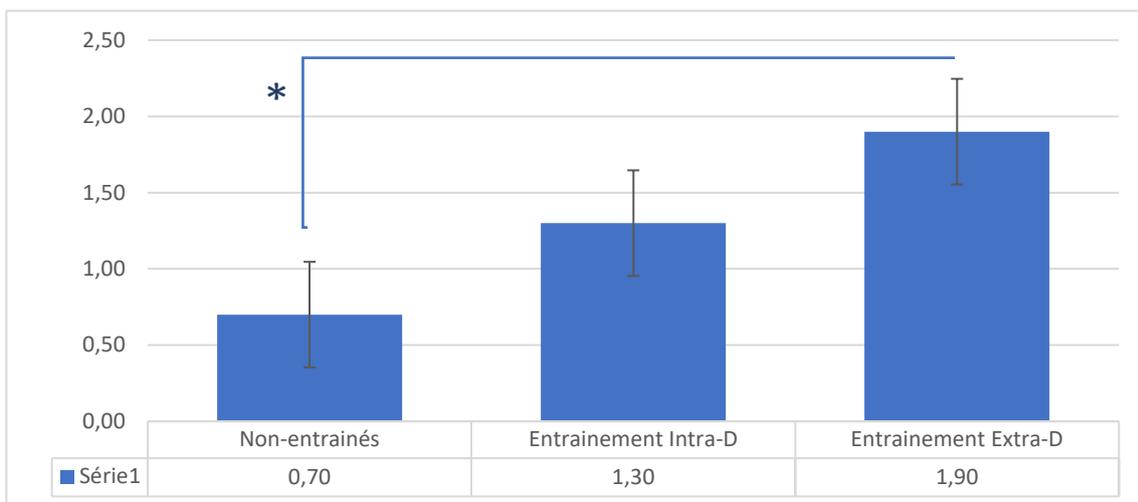


Figure 55, Durées totale de freinage (en seconde), avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$

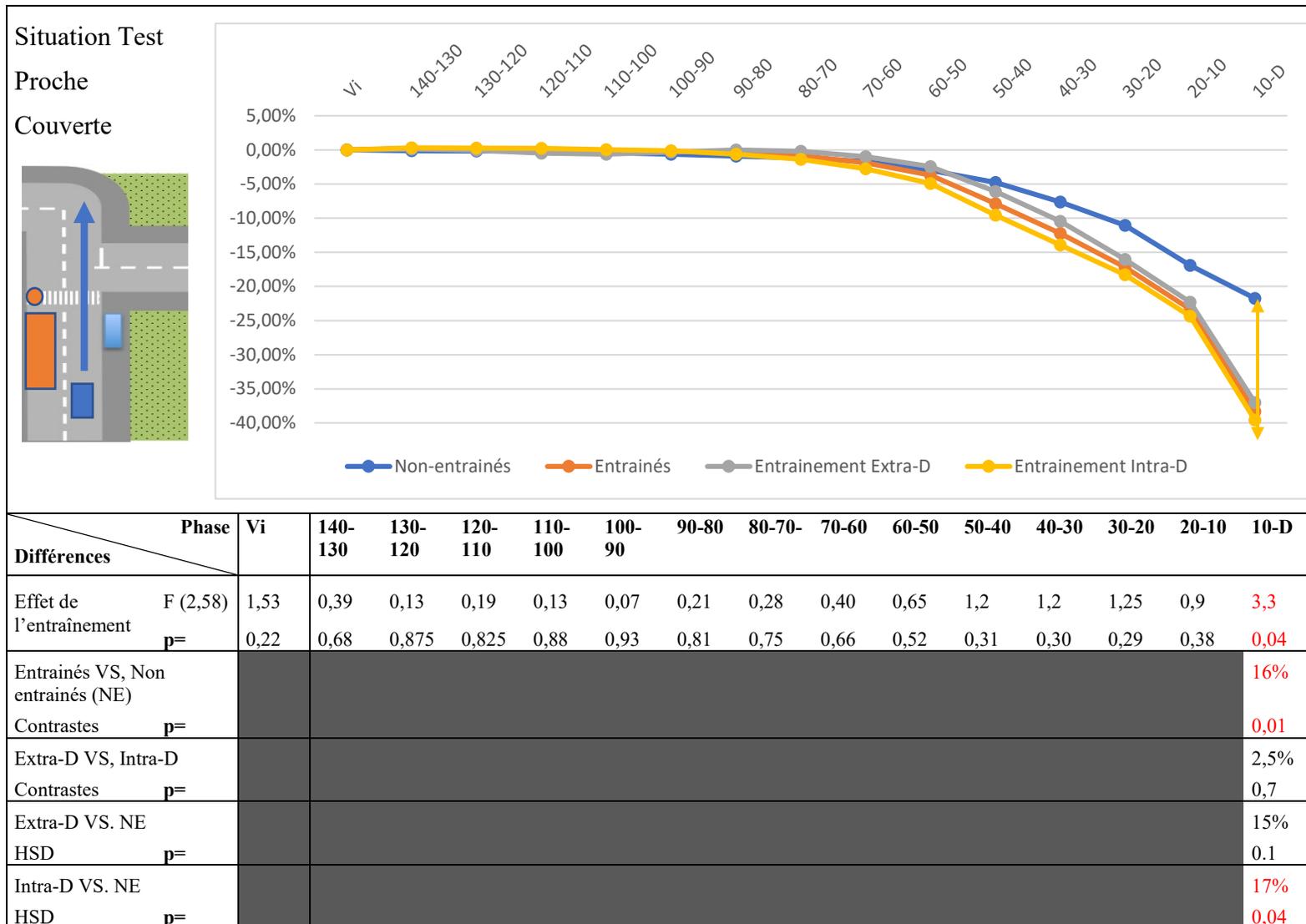


Figure 56, Situation proche couverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale) ; la flèche jaune indique la différences significatives entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés. Les différences sont exprimées en valeurs absolues.

9.3.4 Les rétroactions extradiégétiques et intradiégétiques ne s'accompagnent pas d'un effet de transfert sur les situations lointaines

Après analyse, on ne peut pas conclure à une différence significative entre les différents groupes de conducteurs quant à l'évolution de leur vitesse au cours des situations lointaines ouverte comme couverte – et ce à toutes les phases – ainsi que sur l'ensemble des indicateurs (voir figures 57 et 58).

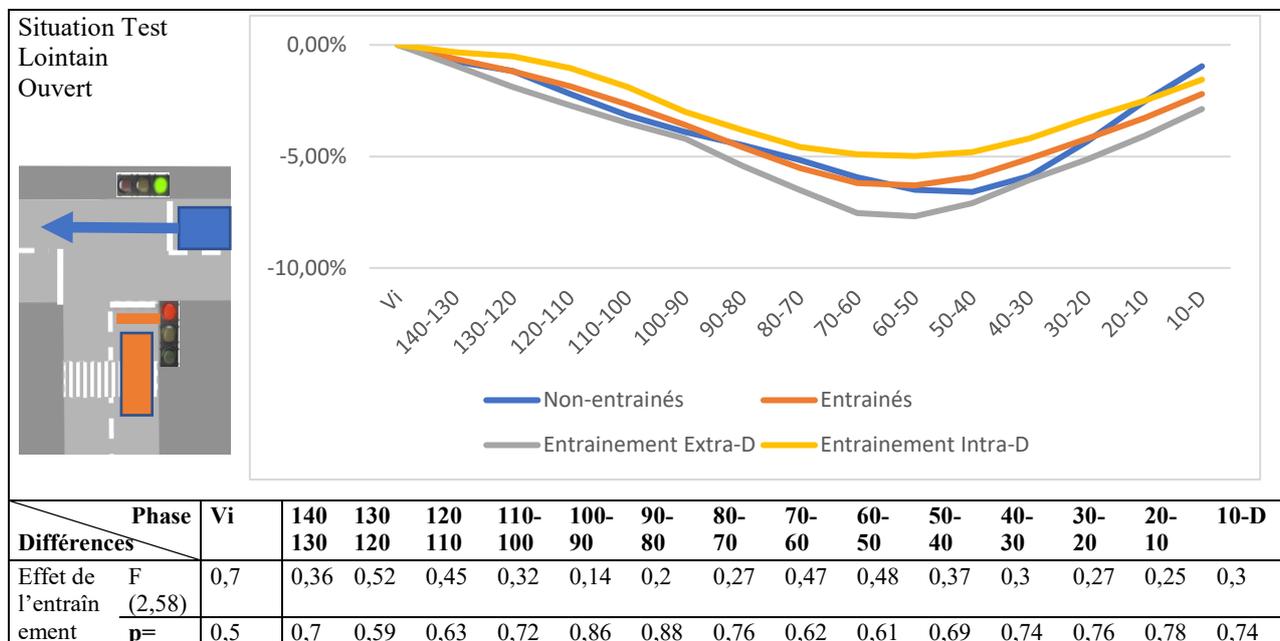


Figure 57, Situation lointaine ouverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale)

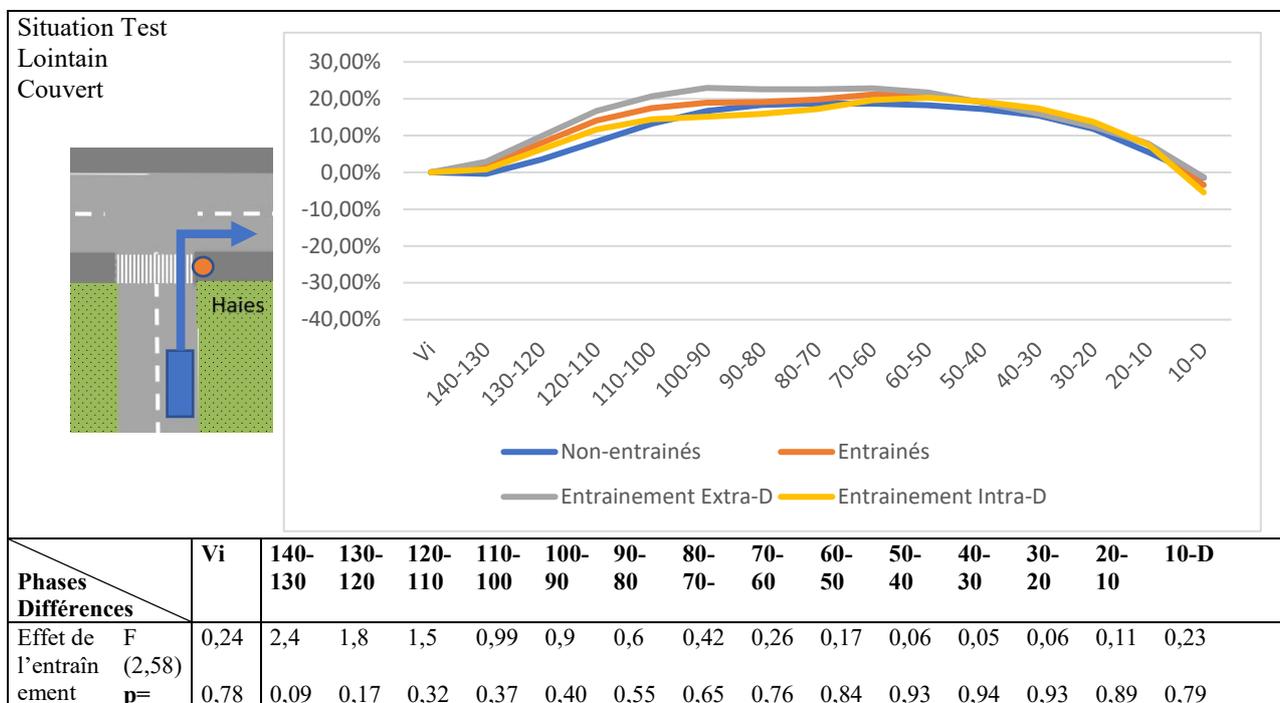


Figure 58, Situation lointaine couverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale)

9.4 Discussion

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'efficacité de protocoles d'entraînement des compétences de conduite d'anticipation. Nous commençons par discuter nos résultats au regard de la distance de transfert des compétences aux situations similaires, proches et lointaines. Puis, nous discutons de l'efficacité relative des modalités de rétroactions utilisées dans l'étude pour favoriser ce transfert. Enfin, nous discutons les implications théoriques soulevés par nos résultats au regard des modèles de la prise de décision.

9.4.1 *Des effets de transfert seulement observés en situations similaires et proches*

Nos résultats permettent de conclure à l'effet de l'entraînement uniquement sur les situations similaires et sur les situations proches des situations d'entraînement. Sur ces situations, les conducteurs entraînés ont davantage ralenti avant d'arriver au lieu du danger que les conducteurs non entraînés. Ils démontrent également une meilleure anticipation des dangers. Ils freinent plus de fois (situations similaires-couvert et proche-ouvert), plus longtemps (situation proche-couvert) et plus tôt (situations similaire-ouvert) avant d'arriver au lieu du danger. Ils arrêtent d'accélérer plus longtemps avant le danger (situation proche-ouvert), et ils restent plus longtemps sans appuyer ni sur l'accélérateur, ni sur le frein (comportement de ralentissement progressif – situation proche-ouvert). Ce n'est pas le cas pour les situations lointaines, dans lesquels aucun transfert n'est constaté.

Ces résultats sont similaires à ceux observés dans la littérature, excepté pour les situations lointaines (Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). En effet, bien qu'ils soient d'ordinaire les moins bien réussis, les scénarios lointains bénéficient quand même de l'apprentissage dans les études recensées. Une piste d'explication pourrait provenir des différences entre les modalités de rétroactions présentées dans cette étude, et les protocoles présentés dans la littérature. En effet, les protocoles présentant des situations lointaines dans la littérature ont tous la particularité de proposer une rétroaction différée supplémentaire à la rétroaction immédiate initiale. Ce n'est pas le cas dans notre étude où seule une rétroaction immédiate, soit sous une forme « par erreur » intradiégétique, soit sous une forme de message textuel, extradiégétique, est présentée au conducteur. Or, les rétroactions différées pourraient favoriser la prise de conscience nécessaire à l'apprentissage, en diminuant l'interférence entre l'action inadaptée ayant amené la rétroaction et l'action adaptée à apprendre (Falzon et al., 2014; Kulhavy & Anderson, 1972; Shute, 2008).

Une autre piste d'explication pourrait être liée à la distance de surface trop importante entre la situation d'entraînement et la situation lointaine. Par exemple, la situation couverte lointaine reprend la situation couverte « haie » de l'étude 2. Dans l'étude 2, les conducteurs expérimentés anticipent correctement la survenue d'un danger dans la situation « haie » au contraire des conducteurs novices. Dans l'étude 3, malgré l'entraînement, les conducteurs ne démontrent pas de comportements d'anticipation du danger dans la situation « haie », au contraire de la situation « camion ». Par conséquent, un entraînement tel que celui proposé dans cette étude pourrait être inefficace pour l'apprentissage des compétences nécessaires à la maîtrise d'une situation trop lointaine de l'entraînement. Plus spécifiquement, le schéma de situation acquis lors de la situation d'entraînement serait aisément appliqué à la situation identique, parviendrait également à être généralisé à la situation proche, mais ne parviendrait pas à être généralisé à la situation lointaine. Cette dernière pourrait toutefois être maîtrisée par des conducteurs ayant une expérience de conduite suffisamment importante pour avoir rencontré un grand nombre de situations possédant la même structure, mais des traits de surface différents. Ces derniers possèderaient en effet de nombreux schémas de situation couvertes ou ouvertes, pouvant s'appliquer à des formes variées de ces dernières.

9.4.2 Efficacité comparée des modalités de rétroaction formatives extra et intradiégétiques

Malgré la présence d'un effet de transfert dans les scénarios similaires et proches, les deux modalités de rétroactions extra et intradiégétiques ne présentent pas une efficacité équivalente. En effet, nos résultats indiquent que la modalité extradiégétique est la plus efficace pour favoriser le développement des compétences d'anticipation.

9.4.2.1 Des rétroactions extradiégétiques efficaces

Les rétroactions extradiégétiques proposées apparaissent efficaces pour l'apprentissage des compétences perceptives et cognitives en réalité virtuelle. Les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique ralentissent plus précocement, démontrent des comportements de freinage plus long, plus nombreux et plus précocement avant le lieu du danger potentiel. Ils démontrent également des comportements de décélération plus précoce avant d'arriver au lieu du danger potentiel. Ce résultat est inédit à notre connaissance.

L'efficacité des rétroactions extradiégétiques serait expliquée par leur capacité à favoriser la connaissance du résultat de l'action (Falzon et al., 2014). En effet, elles présentent tous les critères d'efficacité identifiés par Shute (2008). Elles sont spécifiques, élaborées et rendent explicite le lieu du danger potentiel, sa nature et la nécessité pour le conducteur d'effectuer une action pour l'éviter. Elles rendent également claires les conséquences potentielles de l'absence d'action dans la situation.

De plus, elles apparaissent pratiques et économiques à mettre en place. Elles sont peu contraignantes et ne demandent pas de rétroactions différées supplémentaires comme ce qui a pu être observé dans de nombreuses études (R. W. Allen et al., 2011; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Dans une optique de diffusion d'un programme d'entraînement à grande échelle, elles sont auto-suffisantes au sens où elles n'ont pas besoin de la présence d'un enseignant ou d'un formateur pour être délivrées à l'apprenant. Enfin, leur mode de délivrance est flexible et adaptable à l'ensemble des situations contenant un danger potentiel, voire à l'ensemble des situations critiques pour l'apprentissage.

9.4.2.2 Des rétroactions intradiégétiques inefficaces

Au contraire, les rétroactions intradiégétiques, apparaissent inefficaces pour l'apprentissage des compétences perceptives et cognitives en réalité virtuelle. En effet, sauf de façon marginale, nos résultats ne démontrent pas de différence entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs de la condition contrôle. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux observés dans la littérature (R. W. Allen et al., 2010, 2011; Ivancic & Hesketh, 2000; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010).

Une explication de cette inefficacité pourrait être liée à la modalité « par erreur » passive utilisée dans cette étude. En effet, notre approche est basée sur une absence d'action, dans une situation présentant un danger qu'il fallait pourtant éviter. Cela pourrait expliquer la différence avec les résultats de la seule étude à notre connaissance présentant uniquement une rétroaction intradiégétique aux conducteurs. En effet, dans leur étude, Ivancic & Hesketh (2000) constatent une supériorité du groupe entraîné face au groupe non entraîné. Cependant, il s'agit d'une approche « par erreur active » basée sur la présence d'une action erronée de la part du conducteur dans une situation ne proposant pas de danger à priori. Ce dernier cas pourrait favoriser l'apprentissage expérientiel (Kolb, 1984; Kolb & Kolb, 2012; Morris, 2019). En effet, le conducteur est à l'arrêt et a donc tout le temps d'évaluer la situation avant de prendre une mauvaise décision. Il doit décider d'expérimenter une solution, potentiellement décidée de

façon analytique via des processus de simulation mentale par exemple (Klein, 2008; Klein et al., 1986). Par conséquent, lorsqu'arrive l'erreur, il recevrait une rétroaction concernant explicitement le « résultat de l'action », et favorisant donc l'abstraction des règles de la situation (Falzon et al., 2014; A. Y. Kolb & Kolb, 2012; Morris, 2019). Ces mécanismes n'ont potentiellement pas lieu dans le cas de notre situation. En effet, la situation est dynamique et de ce fait, le conducteur dispose de moins de temps pour évaluer la situation et prendre sa décision. Par conséquent, le résultat de la non-action pourrait être moins efficace pour favoriser l'apprentissage expérientiel.

Deux points supplémentaires pourraient expliquer cette inefficacité. Le premier est que ces rétroactions ne sont pas systématiques, au sens où il n'est pas garanti qu'elles mettent les apprenants en situations critiques pour l'apprentissage (Hirsch & Bellavance, 2017; Ivancic & Hesketh, 2000). En effet, dans une approche « par erreur » passive, un point fondamental est que l'apprenant se retrouve en situation difficile ou risquée, matérialisée ici par l'occurrence d'un presque accident. Or, dans une situation complexe et dynamique en réalité virtuelle, la situation d'échec ne peut être garantie par le système. Par exemple, les novices peuvent démontrer des comportements adaptés à l'évitement du danger potentiel, même si ils ne possèdent pas les compétences nécessaires (Higelé et al., 2011; Lucidi et al., 2010). Par ailleurs, le système ne peut non plus garantir la réception de la rétroaction par l'apprenant. En effet, même si le novice perçoit le message véhiculé par la rétroaction, sous la forme d'une difficulté, ou d'un risque, il n'y a pas de garantie que ce message soit interprété comme une remise en cause de ses propres compétences (Burkhardt, Cabon, et al., 2016). La rétroaction peut en effet être attribuée par exemple entièrement à l'incompétence des autres usagers, ce qui pourrait ne pas déclencher le processus d'apprentissage expérientiel (Morris, 2019). Par conséquent, nos résultats tendent à confirmer le constat de plusieurs auteurs qui avancent que les rétroactions intradiégétiques sont peu claires, difficiles à interpréter et de manière générale de mauvaise qualité pour les apprenants (Hirsch & Bellavance, 2017; Kuiken & Twisk, 2001). Un tel constat serait alors susceptible d'expliquer pourquoi l'approche « par erreur » passive est systématiquement accompagnée d'une rétroaction différée supplémentaire dans les études qui l'utilisent (R. W. Allen et al., 2011; Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010).

9.4.2.3 Des rétroactions qui déclenchent réellement un apprentissage ?

Ces conclusions posent la question de ce qui a réellement été appris par les conducteurs entraînés. En effet, une amélioration des performances pourrait être due à un accroissement momentané de la vigilance, pendant les scénarios tests.

Un accroissement de la vigilance a été observé chez des populations de motards ou de policiers confrontés à des situations de trafic dense ou de poursuite respectivement (Crundall et al., 2003; G. Underwood et al., 2013). Dans ces situations à risque, ces usagers présentent de meilleures performances d'anticipation, en comparaison d'usagers lambda. Toutefois, dans l'étude de Underwood et al., (2013), les motards témoignent également de plus de comportements de fausses alarmes. Ils regardent systématiquement l'intégralité des localisations de danger potentiel, y compris celles ne présentant qu'un faible risque.

Par conséquent, une différence entre les deux modalités de rétroaction pourrait être due à leur capacité relative à placer les conducteurs en état d'hyper vigilance. La rétroaction extradiégétique, claire et explicite concernant les risques liés à la situation pourraient favoriser un accroissement de la vigilance des conducteurs. C'est alors cet accroissement de la vigilance qui améliorerait momentanément les performances des conducteurs entraînés lors de la situation test. Le manque d'efficacité de la rétroaction intradiégétique pourrait être dû à un effet moindre sur la vigilance des conducteurs.

9.4.3 Implications théoriques

Sur un versant théorique, nos résultats confirment la présence de prises de décisions anticipatoires au niveau tactique, pour réduire mécaniquement le risque en situation contenant un danger potentiel (Crundall et al., 2010, 2012; Fuller, 2005; Wang et al., 2010). En effet, les différences observées en termes de comportements d'anticipation diffèrent de celles observées dans l'étude 2. Dans cette dernière, les conducteurs expérimentés ne présentaient pas plus de comportements de ralentissements anticipatoires que les conducteurs novices. Néanmoins, ils détectaient les dangers plus rapidement et y réagissaient plus vite. Ils démontraient également un comportement d'amorçage du freinage, signifiant de meilleures compétences d'anticipation opérationnelle. Dans cette étude au contraire, les conducteurs entraînés présentent ces comportements de ralentissement anticipatoires. Ils ralentissent plus précocement avant d'arriver au lieu du danger potentiel que les conducteurs non entraînés.

Nous proposons par conséquent un ajout au modèle de la prise de décision anticipatoire opérationnelle proposé lors de l'étude 2 (voir figure 59). En plus du processus d'amorçage comportemental, le modèle ci-présent décrit le processus de prise de décision anticipatoire, advenant au niveau tactique.

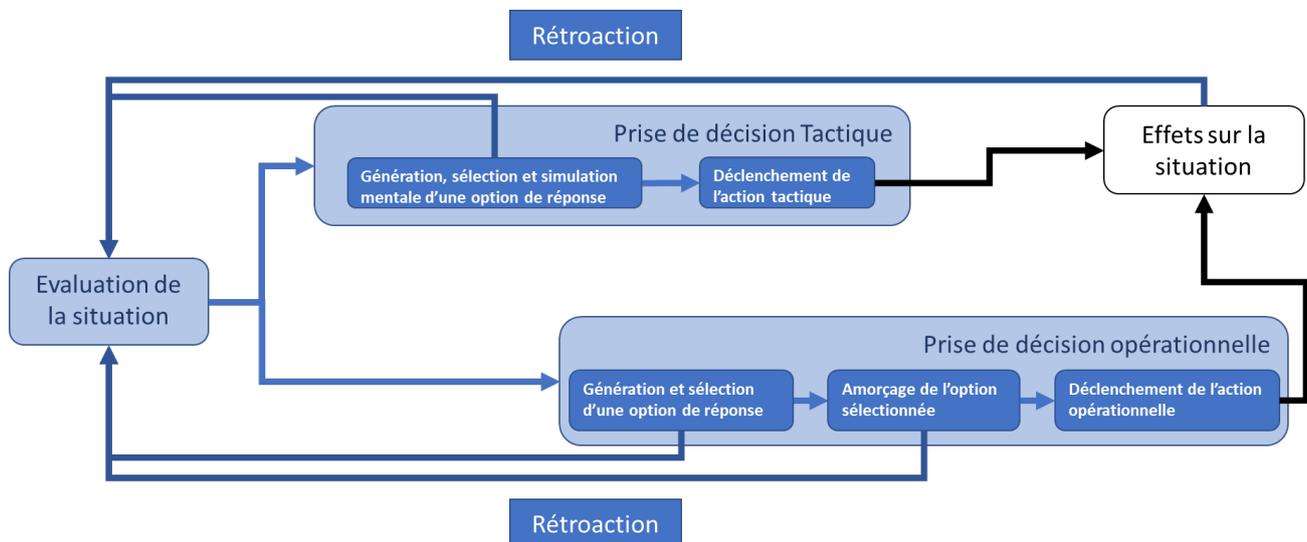


Figure 59, schéma de la prise de décision tactique et opérationnelle anticipatoire en conduite. Les flèches bleu clair indiquent l'influence de l'évaluation de la situation sur les prises de décisions. Les flèches bleu foncé indiquent l'influence rétroactive des prises de décisions sur l'évaluation de la situation. Les flèches noires indiquent l'effet des prises de décisions sur la situation de

Ces deux processus sont en parti concomitants. Après avoir évalué la situation et émis une hypothèse sur la présence éventuelle d'un danger, le conducteur anticiperait un danger potentiel de deux façons. Il générerait d'abord une option de réponse tactique, visant à faire mécaniquement décroître le risque potentiel. A l'instar de ce que nous avons constaté dans l'étude 1, ces décisions tactiques seraient majoritairement composées de ralentissements importants de l'allure. En parallèle, les conducteurs générerait une option de réponse visant à être déclenchée au niveau opérationnel. Il s'agit du processus d'amorçage décrit dans l'étude 2. Lorsque les conducteurs n'anticipent pas un danger potentiel, ils ne démontreraient ni action tactique, ni amorçage opérationnel. La vitesse serait alors plus élevée et le freinage plus tardif, augmentant de fait les risques de collision (M. Green, 2000).

9.5 Conclusion, perspectives et limites

9.5.1 Limites

Quelques limites méthodologiques concernent notamment la réalisation des scénarios et la constitution de l'échantillon.

En effet, du point de vue technique, nous avons conçu les scénarios intradiégétiques pour que le danger soit difficilement évitable par le conducteur. Cependant, la liberté donnée par le simulateur empêche de s'assurer que tous les conducteurs de cette condition aient bien connu la même situation.

L'inclusion des conducteurs dans l'échantillon est en partie basée sur des déclarations subjectives de quantité de kilomètres parcourus depuis l'obtention du permis. De telles informations sont difficiles à vérifier. De plus, 1000km effectués en zones densément peuplées n'impliquent pas la même expérience de conduite que 1000km d'autoroute, ou de conduite en campagne. Cependant, l'ajout d'un tel filtre compliquerait encore l'accès à une population déjà difficile à atteindre. Dans cette étude, nous avons sélectionné avant tout une population de conducteurs possédant une marge de progression importante. Il s'agissait donc de réunir en priorité des conducteurs occasionnels, possédant le permis depuis peu ou n'ayant que très peu conduit depuis son obtention.

Par ailleurs une limite supplémentaire tient à la proximité temporelle entre la situation d'apprentissage et la situation de test, séparées seulement d'une dizaine de minutes. En effet, cette proximité nuance l'efficacité de l'apprentissage et ne permet pas d'être certain qu'il ne s'agit pas de l'effet d'accroissement momentané de la vigilance mentionné précédemment.

9.5.2 Conclusion et perspectives

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'efficacité de protocoles favorisant le développement des compétences de conduite d'anticipation en réalité virtuelle. Dans ce cadre, 61 conducteurs ont été répartis équitablement sur trois modalités de rétroactions : intradiégétiques, extradiégétiques et contrôles. Ces protocoles étaient administrés sur des situations couvertes et ouvertes. Leurs effets étaient testés sur des situations similaires, proches et lointaines de la situation d'entraînement.

Nos résultats montrent que les rétroactions extradiégétiques sont les plus efficaces pour le développement, au moins à court terme des compétences perceptives et cognitives. Notamment, elles observent un transfert des acquis vers l'ensemble des situations ouvertes et couvertes, similaires et proches de la situation d'entraînement. Par conséquent, le protocole proposé dans notre étude pourrait constituer une approche avantageuse pour l'étude et la formation des compétences perceptives et cognitives en réalité virtuelle. Pour s'en assurer, une première perspective serait alors de prolonger cette étude, en organisant un suivi longitudinal à long terme de l'efficacité de l'entraînement. Un tel suivi, par la passation de tests réguliers sur d'autres situations proches et similaires, permettrait de s'assurer de la présence d'un réel apprentissage, et non pas d'une hausse temporaire de la vigilance.

Notre étude montre également que des rétroactions différées ne sont pas forcément nécessaires pour favoriser le développement des compétences. Dans notre étude, aucune rétroaction différée n'était administrée aux conducteurs. Pourtant, l'efficacité des rétroactions immédiates extradiégétiques apparaît comparable à celle observée dans les études présentant une rétroaction différée en plus d'une rétroaction immédiate (R. W. Allen et al., 2011; Fisher et al., 2006; Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006; Vlakoveld et al., 2011; Wang et al., 2010). En plus d'être cohérente avec les critères d'efficacité des rétroactions de Shute (2008), notre rétroaction présente l'avantage d'être pratique. En effet, elle est peu chronophage et

nécessite peu d'intervention par un formateur. Par ailleurs, une telle rétroaction, légère et pratique pourrait être aisément personnalisable en fonction des performances et des erreurs commises par l'apprenant.

Toutefois, nos résultats montrent aussi l'importance de l'exposition des novices à un panel divers de situations de conduite durant la formation. En effet, même les rétroactions extradiégétiques immédiates ne parviennent pas à provoquer un transfert aux situations lointaines. Pourtant, ces dernières, possèdent la même structure que les situations d'entraînement. Elles n'en diffèrent que par leurs traits de surface. Cela pourrait signaler que certains traits de surface, déterminants pour l'anticipation de la situation sont plus reconnaissables que d'autres et donc plus faciles à utiliser pour évaluer la situation pour les conducteurs. Par exemple, la « haie » de la situation couverte lointaine ne semble pas être un indice aussi prégnant que le « camion » de la situation similaire. Un tel échec de la rétroaction extradiégétique suggère que les schémas de situations acquis durant l'entraînement pourraient être difficilement généralisables à d'autres situations qui possèderaient la même structure, mais qui seraient trop différentes en termes de traits de surface. Davantage de travaux apparaissent ainsi nécessaires, tant pour préciser le contenu de la formation en termes de situations proposées, que pour caractériser précisément la distance entre ces situations.

Troisième partie : Discussion générale et conclusion

10 Discussion générale

Ce chapitre synthétise et discute les principales contributions de nos travaux. Le chapitre suivant conclue et propose des perspectives pour continuer ce travail, ainsi que ses limites.

10.1 L'acquisition des compétences de conduite de haut niveau durant les premiers mois de la conduite

Un objectif de la thèse était de contribuer à la compréhension des mécanismes et des situations d'apprentissage des compétences de conduite de haut niveau, en particulier perceptives et cognitives. L'expérience de situations critiques pour l'apprentissage, c'est-à-dire remarquables sur le plan de la difficulté et/ou du risque, pourrait favoriser le développement des compétences (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016). En particulier, ces situations auraient la capacité de faciliter l'occurrence d'un apprentissage expérientiel chez les conducteurs novices. Un tel mécanisme serait alors susceptible de fournir une piste d'explication à la décroissance importante du surrisque des conducteurs novices, durant les premiers mois de la conduite autonome (Mayhew, Simpson, Desmond, et al., 2003; McCartt et al., 2003)

10.1.1 Un apprentissage expérientiel durant les premiers mois de la conduite autonome

10.1.1.1 Un apprentissage par l'expérience concrète de situations critiques

L'étude 1 met en évidence et précise la présence d'un apprentissage expérientiel centré sur l'acquisition des compétences perceptives et cognitives de conduite, durant les premiers mois d'autonomie sur la route. Dans l'apprentissage expérientiel (Kolb, 1984; Kolb & Kolb, 2012), le résultat (réussite, échec) de la rencontre avec des situations concrètes fournit une base de réflexion à l'apprenant quant à l'efficacité de ses compétences dans la situation. Cette base de réflexion permet l'abstraction des règles qui sous-tendent la situation, sous la forme de schémas de situations, et l'identification d'éventuelles solutions d'actions pour la maîtriser. Ces schémas sont alors appliqués aux situations similaires rencontrées ultérieurement, avec pour conséquence une amélioration potentielle de la performance. A notre connaissance, ce modèle n'a jamais été utilisé pour expliquer la diminution du surrisque durant les premiers mois d'autonomie, par l'acquisition des compétences de conduite jusqu'alors défailtantes ou incomplètes (Government Queensland, 2005; Mayhew, Simpson, Desmond, et al., 2003; McCartt et al., 2003). Pourtant, de nombreux auteurs s'accordent pour indiquer que cet apprentissage serait pratique, advenant « sur le tas » par la rencontre avec des situations critiques dépassant les capacités du conducteur (Brehmer, 1994; Burkhardt, Corneloup, et al., 2016; Williams et al., 2013).

L'étude 1 interrogeait des conducteurs novices sur les caractéristiques et les conséquences de situations critiques expérimentées durant les premières années d'autonomie. Les résultats montrent que 84% des situations critiques rapportées étaient associées à un apprentissage. En particulier, 85% de ces apprentissages ciblaient les compétences perceptives et cognitives. En termes de répartition, 60% des apprentissages ciblaient les compétences d'évaluation de la situation, alors que 25% des cas environ ciblaient les compétences de prise de décision.

La mise en évidence d'un tel apprentissage expérientiel repose sur les rapports verbaux des conducteurs. Par exemple, dans un incident typique de l'apprentissage des compétences d'évaluation de la situation, un conducteur rapporte : « Le type sortait du rond-point [...] d'un coup il a changé de trajectoire et m'a coupé la route [...] Du coup maintenant [...] dans les situations d'insertion je regarde à gauche, à droite et mes angles morts. ». Dans ce verbatim, le conducteur explicite que l'expérience d'une situation critique a provoqué une amélioration à

long terme de ses compétences de conduite. Plus spécifiquement les mots « du coup maintenant » et la précision « dans les situations d'insertion » précisent les conséquences de l'expérience sur l'abstraction d'un schéma de situation. Ce schéma est associé à des comportements concrets, dont l'application sera par la suite généralisée à des situations ressemblantes.

10.1.2 Compétences impliquées dans l'occurrence de situations critiques

La thèse visait également à dégager les caractéristiques des compétences impliquées dans l'occurrence des situations critiques. Pris ensemble, les résultats des études 1 et 2 confirment la prévalence des défaillances des compétences perceptives et cognitives de haut niveau lors des premiers temps de la conduite (Braitman et al., 2008; Deery, 1999; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018) et leur implication dans l'expérience de situations critiques associées au développement de compétences de conduite de haut niveau.

Les résultats de l'étude 1 montrent que la plupart des situations critiques sont causées par des défaillances des compétences perceptives et cognitives et incluent la présence d'un autre usager de la route. Parmi ces défaillances, 50% concernent directement des erreurs d'évaluation de la situation ou de prise de décision. De plus 25% des situations sont causées par une incapacité du conducteur à contrecarrer une situation dangereuse engendrée par le comportement inadapté ou imprévu d'un autre usager. Or, ce type de situation fait également intervenir les compétences perceptives et cognitives d'anticipation. En effet, la route est un environnement partagé, dans lequel le conducteur évolue parmi d'autres usagers, également susceptibles de commettre des erreurs (Wilde, 1976). Par conséquent, une fonction essentielle des compétences perceptives et cognitives est de contrecarrer les actions potentiellement dangereuses de ces autres usagers (Bjørnskau & Sagberg, 2005; Crundall, 2016; Crundall et al., 2012; Deery, 1999; Munduteguy & Ragot-Court, 2011).

Par construction, l'étude 2 analyse plus précisément l'implication des compétences d'anticipation dans le cas de situations ouvertes et couvertes. Dans les situations ouvertes, un véhicule ou un piéton est visible en amont. Le conducteur doit anticiper ses agissements pour prévenir une action dangereuse potentielle de sa part. Dans les situations couvertes, le véhicule ou le piéton est occulté par un élément de l'environnement. Le conducteur doit anticiper sa présence potentielle pour éviter une situation à risque. Ces situations avaient été choisies pour trois raisons. D'une part parce que la survenue du danger y est directement causée par des défaillances des compétences d'anticipation (Crundall, 2016; Crundall et al., 2012). D'autre part parce qu'elles sont courantes dans l'accidentologie des conducteurs novices (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018). Enfin, parce qu'elles correspondent aux situations critiques les plus couramment rencontrées par les conducteurs novices dans l'étude 1.

Dans les situations ouvertes, les résultats de l'étude 2 montrent que les expérimentés anticipent mieux les risques éventuels, en freinant plus précocement que les novices avant d'arriver au lieu du danger potentiel. Dans les situations couvertes, les conducteurs expérimentés démontrent des comportements de recherches visuelles anticipatoires du danger. En effet, les conducteurs expérimentés observent des délais plus courts que les novices entre l'apparition du danger et sa détection visuelle, mais également entre la dernière fixation sur l'élément cachant le danger et sa détection visuelle. De plus, les expérimentés démontrent également des comportements d'amorçages anticipatoires d'une action de freinage, au cas où ce danger se manifesterait brutalement. En effet, les conducteurs expérimentés freinent plus rapidement après avoir détecté visuellement le danger que les conducteurs novices.

10.1.3 Apports pour la compréhension des compétences de conduite de haut niveau

Après avoir identifié les mécanismes de leur apprentissage, un enjeu supplémentaire de la thèse visait à enrichir la compréhension des compétences perceptives et cognitives. Il s'agissait d'abord de préciser leur implication dans la survenue des situations critiques d'apprentissage. Il s'agissait ensuite de parfaire notre connaissance des mécanismes qui sous-tendent ces compétences et leur articulation.

10.1.3.1 Apports pour la compréhension des compétences perceptives et cognitives

Nos travaux permettent d'enrichir la compréhension des compétences d'évaluation de la situation et de prise de décision nécessaires à l'anticipation des dangers routiers. Notamment, ils permettent d'identifier deux types de perception des situations routières : passive et active, et mettent à jour deux mécanismes d'anticipation comportementale des dangers.

L'étude 2 confirme la présence de deux types de perception chez les conducteurs (Gugerty, 2011). Une perception active est identifiée par le constat chez les conducteurs expérimentés de temps plus courts entre le dernier regard sur l'élément cachant le danger, et la détection du danger. Un tel délai signifie que le regard des conducteurs était positionné à proximité de la zone d'apparition potentielle du danger quand ce dernier est apparu. Nous interprétons ce comportement comme une recherche active du danger. En effet, la perception « active » est une perception « top-down » soutenue par la vision focale. Elle est guidée par les connaissances à priori et le résultat de l'évaluation de la situation. Elle a pour objectif la recherche d'éléments d'intérêts dans l'environnement pour l'efficacité et la sécurité de la conduite. L'étude 2 confirme également la présence d'une perception visuelle passive qui n'est pas influencée par les compétences d'anticipation (Gugerty, 2011; Yantis & Jonides, 1984). En effet, dans une situation d'intrusion, le danger ne peut pas être anticipé. Or, au contraire des situations couvertes, les conducteurs expérimentés et novices ne diffèrent pas sur la vitesse de détection du danger dans cette situation. Par conséquent, le danger y est repéré par le phénomène de capture attentionnelle, qui n'apparaît pas être influencé par l'expérience des conducteurs (Gugerty, 2011; Yantis & Jonides, 1984).

Les études 2 et 3 permettent de décrire comment les conducteurs maîtrisent une situation de conduite contenant un danger potentiel. Lors de la phase d'évaluation de la situation, les étapes de compréhension et de projection permettent au conducteur d'émettre une hypothèse sur l'état futur du système (Endsley, 1995b). Lorsque cette hypothèse concerne l'occurrence probable d'un danger, le conducteur opère 2 processus de prise de décision. Le premier est une prise de décision anticipatoire s'exprimant au niveau de performance tactique, c'est-à-dire plusieurs secondes avant l'arrivée au lieu du danger potentiel (Fuller, 1984, 2005; Michon, 1985). Elle a pour objectif de minimiser mécaniquement les risques d'un potentiel danger à venir. Dans nos travaux, ces décisions sont composées de ralentissements précoces de l'allure, avant l'arrivée au lieu du danger potentiel. Dans l'étude 1, des stratégies supplémentaires concernent l'évitement total de la zone de danger potentiel. Le second est la génération et la sélection d'une option de réponse (Flin et al., 2008; Klein, 2008) qui ferait l'objet d'un amorçage préopératoire. A l'arrivée au lieu du danger potentiel, si ce dernier intervient, l'amorçage permet un déclenchement plus rapide de l'option de réponse sélectionnée, au niveau opérationnel.

10.1.3.2 Apports pour la compréhension des compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources internes

Nos résultats enrichissent également les connaissances sur l'implication des compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources internes dans les situations critiques d'apprentissage rencontrées par les conducteurs novices.

Un premier aspect concerne des défaillances des compétences de gestion des ressources internes en tant que cause des situations critiques. Cette cause est retrouvée dans 10% des situations critiques rapportées. Il s'agit par exemple de situations de panique ou d'anxiété forte. Par exemple, dans un incident typique, un conducteur rapporte « Je devais me garer en bataille et je sais que je me manque toujours, du coup j'étais hyper stressé. Je ne sais pas comment, j'ai réussi à me garer parfaitement et j'étais super content. Maintenant, je suis plus en confiance dans ce genre de situation ». À notre connaissance, aucune étude n'investigue le rôle de l'anxiété dans l'occurrence de situations dangereuses de conduite. Pourtant, nos travaux indiquent que de telles situations existent et qu'elles pourraient être responsables d'une partie du surrisque des conducteurs novices.

Ce verbatim pointe l'apprentissage comme le second aspect de l'implication des ressources internes. En effet, 15% des apprentissages ciblaient les compétences d'auto-évaluation, de régulation des effets délétères du stress et de la fatigue et des tendances à la prise de risque. Or, la régulation des ressources internes est un aspect fondamental de la sécurité et de l'efficacité de la conduite (Assailly, 2013; Hatakka et al., 2002). Dans le verbatim cité au paragraphe précédent, c'est le fait d'avoir surmonté une situation de manœuvre qu'il ne pensait pas pouvoir maîtriser qui a provoqué une amélioration des compétences d'auto-évaluation du conducteur, et par là de la confiance en soi.

Enfin, le troisième aspect correspond à l'implication des émotions comme le produit d'une situation critique. En effet, nos données de l'étude 1 indiquent que 60% des situations critiques vécues sont associées à des sentiments d'anxiété, et 15% à des sentiments de colère. Par conséquent, le ressenti d'une émotion négative à la suite d'une situation de conduite risquée ou difficile pourrait être un facteur de l'apprentissage (voir par exemple Damasio, 1994; Isen, 1993; Pavlov, 1927). Pourtant, le rôle spécifique des émotions n'a que peu été investigué dans le cadre de l'apprentissage expérientiel à notre connaissance (Moon, 2004).

10.1.4 Résumé schématique des contributions de la thèse concernant l'acquisition et la compréhension des compétences de conduite de haut niveau

Nos travaux complètent la synthèse de la littérature, proposée sous la forme d'un schéma de synthèse des compétences de conduite de haut niveau. L'étude 1 permet d'identifier l'effet rétroactif de l'expérience de situations critiques pour l'apprentissage des compétences de haut niveau. Si ces situations critiques sont en majorité dues à des défaillances des compétences perceptives, certaines proviennent de défaillances des compétences d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles. Les études 2 et 3 mettent à jour les mécanismes des compétences perceptives et cognitives nécessaires pour anticiper les situations potentiellement dangereuses. Notamment, la situation de conduite est perçue de manière active et passive, alors que les prises de décisions anticipatoires y sont observées tant à un niveau opérationnel que tactique. Dans une perspective de formation en simulateur, le schéma de synthèse proposé ci-dessous (voir figure 60) pourrait alors servir de cartographie permettant d'identifier avec précision les compétences ciblées ainsi que les situations nécessaires pour les développer.

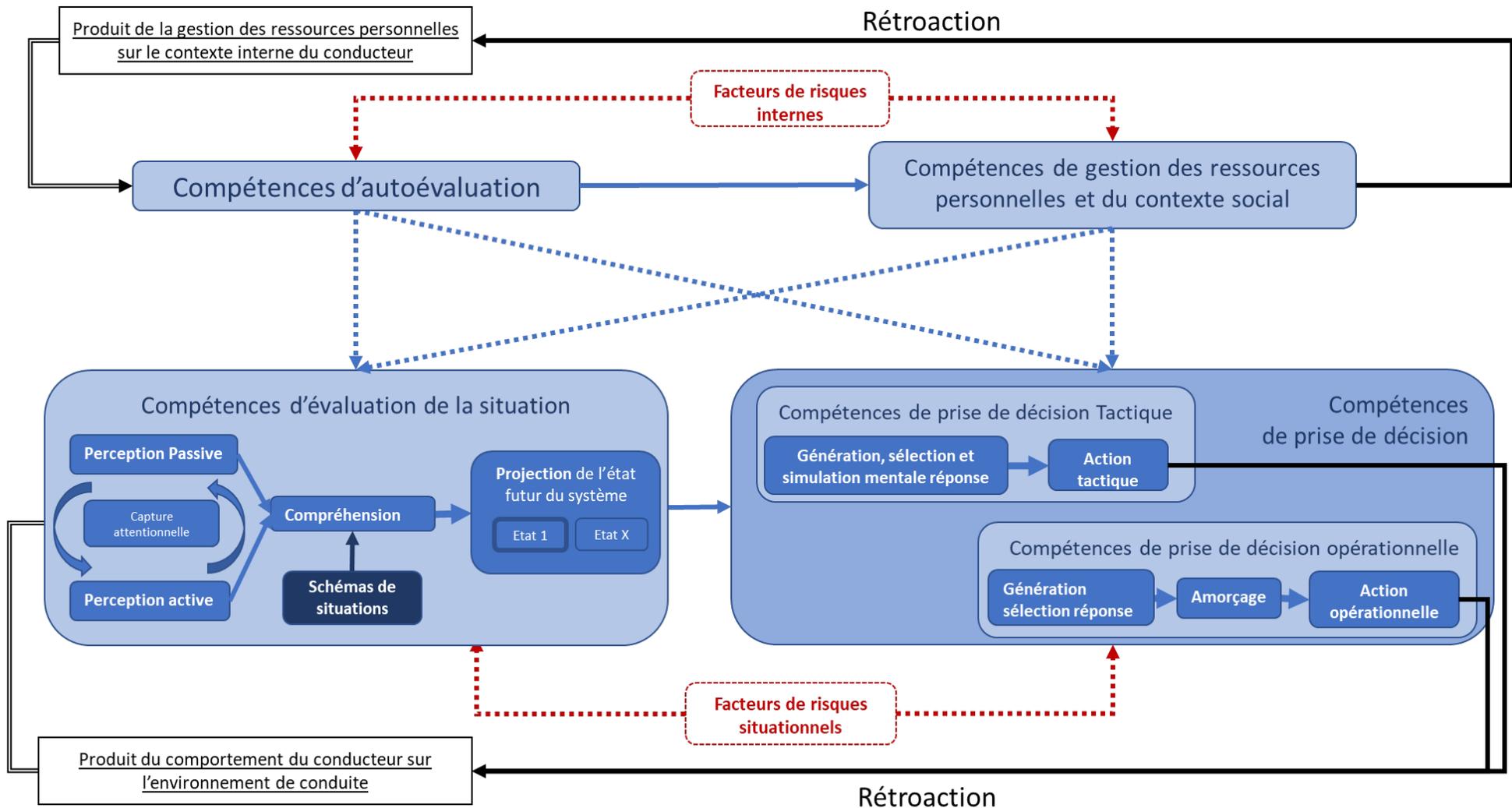


Figure 60, schéma de synthèse des compétences de haut niveau, de leurs interrelations et de leurs rôles pour maîtriser les risques et assurer l'efficacité de la conduite – version mise à jour et simplifiée. Boîtes bleues : compétences ; boîtes rouges : facteurs de risque associés à la conduite. Flèches bleues : effets des compétences d'évaluation sur les compétences de décision et de gestion des ressources personnelles ; flèches pointillées bleues : effets des compétences sur le déploiement d'autres compétences ; flèches pointillées rouges : influence des facteurs de risque sur le déploiement des compétences ; flèches noires : effet des compétences sur la situation et le contexte de la conduite ; flèches noires creuses : effet rétroactif du déploiement des compétences sur les compétences d'évaluation du conducteur

10.2 L'efficacité de la réalité virtuelle et du simulateur pour le développement des compétences de haut niveau

Un second objectif de la thèse était de contribuer à outiller la réalité virtuelle pour mesurer et développer les compétences perceptives et cognitives. En particulier, il s'agissait d'identifier des indicateurs capables d'évaluer finement les compétences d'anticipation des conducteurs. Il s'agissait également d'évaluer l'efficacité de deux modalités de rétroactions pour l'apprentissage « par simulateur ».

10.2.1 Les indicateurs d'évaluation des compétences perceptives et cognitives

Nos travaux confirment l'intérêt d'utiliser des indicateurs combinés pour évaluer les compétences perceptives et cognitives en situations simulées au moyen d'un simulateur. Dans le cadre des situations couvertes de l'étude 2, dans lesquelles un danger apparaît brusquement, des indicateurs basés sur les temps de réaction au freinage et de détection visuelle du danger sont efficaces pour évaluer les compétences. En effet, dans l'étude 2, les indicateurs associés montrent que les conducteurs expérimentés détectent plus rapidement le danger que les conducteurs novices et freinent également plus vite après avoir détecté le danger. De plus, les expérimentés démontrent davantage de comportements de recherche active du danger, qui se traduisent par des délais plus courts entre la dernière fixation sur l'élément cachant un danger, et la première fixation sur le danger.

Toutefois, ces indicateurs sont complexes, logistiquement coûteux et ne peuvent pas être utilisés dans tous les types de situations, notamment celles où un danger ne se déclenche pas, comme dans les scénarios test de l'étude 3. Cependant, par définition, les compétences d'anticipation des dangers se déploient indépendamment du fait qu'un danger se déclenche ou non dans la situation. Elles agissent en amont, pour prévenir la potentialité de la survenue d'un tel élément. Pour évaluer les compétences d'anticipation dans ce type de situations, plusieurs solutions sont potentiellement disponibles.

10.2.1.1 Utiliser la temporalité des comportements oculomoteurs pour évaluer les compétences d'anticipation des conducteurs

Une première solution concerne l'utilisation des indicateurs oculométriques, au regard de la temporalité de la situation contenant un danger potentiel. En effet, l'exploration intensive de l'élément cachant le danger n'est pertinente qu'à l'approche immédiate du lieu du danger potentiel. Il y'a peu d'intérêt à regarder l'avant gauche d'un camion cachant un passage piéton lorsque l'on est encore à 40 mètres dudit passage piéton.

Or, l'approche utilisée pour mesurer ce type de comportements dans la littérature est critiquable. Les études recensées expliquent mesurer des comportements d'anticipation en observant la présence d'au moins une fixation sur l'élément cachant le danger, dans une fenêtre temporelle arbitraire qui n'est pas précisée par les auteurs (Crundall et al., 2012; Pollatsek et al., 2006; Pradhan et al., 2006, 2005). Une telle approche explique peut-être pourquoi Crundall et al. (2012) par exemple, ne détectent pas de différence inter-conducteurs quant aux compétences de recherche visuelle active, lors d'une comparaison expérimentés/novices sur des dangers couverts.

Notre approche dans l'étude 2 permet de dépasser ces limites. En effet, nous avons mesuré les comportements de recherche active du danger via un indicateur de délai entre le dernier regard sur l'élément cachant le danger, et le premier regard sur le danger. Par-là, nous nous assurons d'évaluer des comportements de recherche active au moment le plus opportun. Nos résultats montrent ainsi que dans les situations couvertes, les conducteurs expérimentés démontraient davantage de comportements d'exploration intensive de l'élément cachant le

danger potentiel, spécifiquement à l'approche immédiate de la localisation de ce dernier. Par conséquent, la prise en compte fine de la temporalité des comportements oculomoteurs pourrait constituer une première solution pour évaluer les compétences perceptives et cognitives, même dans des situations ne présentant pas de danger.

10.2.1.2 Analyser les variations d'allure et la gestion du pédalier pour évaluer les compétences d'anticipation des conducteurs

Une seconde solution serait la prise en compte des ralentissements et freinages anticipatoires des conducteurs, avant l'arrivée au lieu du danger potentiel. De tels indicateurs sont également indépendants de la présence d'un danger dans la situation. En effet, dans l'étude 2 comme dans l'étude 3, les conducteurs expérimentés comme entraînés démontrent un ralentissement précoce de l'allure, avant l'arrivée au lieu du danger. Dans l'étude 2, les conducteurs avaient significativement ralenti leur allure à partir de 2 à 3 secondes avant l'arrivée au lieu du danger potentiel dans des situations couvertes, et jusqu'à 4 secondes avant l'arrivée au lieu du danger potentiel dans les situations ouvertes. Dans l'étude 3, en comparaison des conducteurs non-entraînés, les conducteurs entraînés avaient significativement ralenti leur allure jusqu'à 60 mètres du lieu du danger potentiel dans les situations couvertes. Dans les situations ouvertes, un ralentissement plus précoce des entraînés était constaté à partir de 50 mètres du lieu du danger potentiel. Ces résultats sont similaires à plusieurs résultats de la littérature (voir par exemple Crundall, Andrews, van Loon, & Chapman, 2010; Crundall et al., 2012; Wang, Zhang, & Salvendy, 2010).

Toutefois, un point d'intérêt de nos travaux est qu'ils identifient les comportements sous-jacents à ces ralentissements. En effet, nos résultats indiquent que ces ralentissements seraient dus à des comportements de freinages intenses avant l'arrivée au danger. Par exemple, dans la situation ouverte de l'étude 2, les conducteurs expérimentés ont freiné près de 20% plus précocement que les novices, avant d'arriver au lieu du danger potentiel. De même, dans l'étude 3, les conducteurs ayant reçu l'entraînement extradiégétique freinaient jusqu'à 20m plus précocement, jusqu'à 3 fois plus souvent et jusqu'à 2,5 fois plus longtemps que les conducteurs non entraînés. Ce type de comportements de freinages avant l'arrivée au lieu du danger potentiel n'a jamais été utilisé à notre connaissance pour évaluer les comportements d'anticipation des conducteurs. Un indicateur supplémentaire utilisé dans l'étude 3 consistait à identifier à partir de quelle distance du danger potentiel les conducteurs arrêtaient d'utiliser l'accélérateur. En effet, les ralentissements de la vitesse constatés dans les études 2 et 3 pourraient également être expliqués par ce type de comportements. Nos résultats montrent que les conducteurs ayant reçu l'entraînement extradiégétique pouvaient arrêter d'utiliser l'accélérateur près de 60 mètres avant le danger potentiel, contre 40 mètres pour les conducteurs non entraînés.

Une perspective serait alors d'observer le positionnement des pieds au niveau du pédalier entre le relâchement de la pédale et l'appui sur le frein précédant l'arrivée au danger. En effet, dans l'étude 3, les conducteurs ayant reçu l'entraînement extradiégétique pouvaient observer jusqu'à 20 mètres de distance entre le relâchement de la pédale d'accélérateur et l'appui sur la pédale de frein, contre 6 mètres pour les non entraînés. Par conséquent, une distance conséquente s'écoulait sans que les conducteurs ne fasse usage du pédalier. Durant cette distance, l'observation du positionnement des pieds pourrait indiquer des comportements d'anticipation. Par exemple, si le conducteur place son pied au-dessus du frein durant l'approche d'un danger potentiel, cela pourrait expliciter l'amorçage anticipatoire d'un freinage pour minimiser le risque. En effet, par ce positionnement, le conducteur serait plus prompt à freiner rapidement au cas où un danger se déclencherait. Un tel comportement permettrait d'expliquer le délai plus court entre la détection du danger et le premier freinage, observé chez les conducteurs expérimentés dans l'étude 2.

10.2.2 L'efficacité des rétroactions pour l'apprentissage « par simulateur »

Un autre objectif de ce travail était d'évaluer 2 modalités de rétroactions formatives pour l'apprentissage des compétences d'anticipation, dans les limites de l'empan temporel durant lequel le transfert était mesuré. Dans ce cadre, les résultats de l'étude 3 montrent que l'exposition des conducteurs à des situations critiques contenant des dangers – accompagnée de rétroactions extradiégétiques – est efficace pour l'apprentissage. Au contraire, l'exposition à ces mêmes dangers, cette fois accompagnée de rétroactions intradiégétiques, n'apparaît pas efficace pour l'apprentissage.

10.2.2.1 De l'efficacité des rétroactions extradiégétiques

Les rétroactions extradiégétiques combinaient la confrontation en conduite simulée à des situations de danger potentiel et un message textuel, fournis au participant de façon concomitante à son arrivée au lieu du danger potentiel. Le message textuel était spécifique et élaboré, fournissant de façon claire et concise des informations sur le danger dans la situation et sur la nécessité d'y effectuer une action pour l'éviter. En comparaison de conducteurs non entraînés, les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique démontrent de meilleures compétences d'anticipation tactiques que les conducteurs non entraînés. Ils ralentissent plus précocement avant l'arrivée au lieu du danger. Ces ralentissements sont notamment expliqués par des freinages plus longs, plus nombreux, et plus précoces, ainsi que des décélérations plus précoces, avant d'arriver au lieu du danger potentiel.

L'efficacité de ces rétroactions pourrait s'expliquer par leur capacité à favoriser l'apprentissage expérientiel (Kolb, 1984; Kolb & Kolb, 2012). Morris, (2019), indique ainsi qu'une intervention extérieure, qu'elle soit issue des pairs ou des collaborateurs – ou en l'occurrence d'une entité virtuelle tierce – permet d'approfondir l'étape « d'observation réflexive » indispensable à l'apprentissage expérientiel. En effet, ce type d'intervention pousse l'apprenant à une réflexion critique sur ses connaissances et schémas de situation, qu'il va réexaminer à l'aune des informations apportées par les pairs. L'efficacité de la rétroaction serait également améliorée par l'approche « par simulateur » adoptée dans l'étude. En effet, Fede, Gorman, & Cimini (2018), notent qu'un des points clé de l'apprentissage expérientiel est que l'apprenant doit être responsable de ses actions durant toute la phase d'expérience concrète. Dans notre étude, la rétroaction advient lorsque le conducteur est déjà largement engagé dans la situation potentiellement dangereuse. Par conséquent, elle serait idéalement placée pour pousser l'apprenant à une réflexion critique sur son comportement, en lien direct avec les choix précédemment effectués pour anticiper la présence d'un danger potentiel.

Nos résultats dégagent ainsi une piste prometteuse pour le développement de nouvelles approches pour l'apprentissage en simulateur. En effet, de façon étonnante, ce type de rétroaction n'avait jamais été utilisé à notre connaissance pour l'apprentissages de compétences de conduite en simulateur. Pourtant, elles fournissent des résultats au moins similaires aux résultats retrouvés dans les études utilisant une association de rétroactions immédiates et différées (Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). De plus, elles comportent plusieurs avantages. Elles sont légères à mettre en place, nécessitant peu d'interventions humaines extérieures pour être dispensées aux conducteurs. Elles sont aussi flexibles, pouvant être adaptées aisément à un grand nombre de situations critiques pour l'apprentissage, y compris non dangereuses.

La personnalisation des situations et rétroactions apparaît comme une perspective fondamentale du développement de la réalité virtuelle pour la formation (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016). Par leurs qualités, les rétroactions extradiégétiques apparaissent adaptées à une telle personnalisation. Leur flexibilité et leur légèreté leur permettraient par exemple d'être modifiées en direct, au regard d'une évaluation « on-line » des compétences de l'apprenant.

Une telle personnalisation est inédite à notre connaissance. Les quelques études qui proposent une formation évolutive, basée sur les performances des apprenants, le font à l'aide d'un calcul de score de conduite global, dont elles ne précisent pas les critères exacts (R. W. Allen, Park, et al., 2003; R. W. Allen et al., 2010).

10.2.2.2 *Rétroactions intradiégétiques*

Les rétroactions intradiégétiques incluaient l'occurrence d'un presque accident, causé par une action inattendue d'un autre usager de la route (véhicule ou piéton). Ce type de rétroaction constitue une approche « par erreur » passive courante dans la littérature (Vlakveld et al., 2011; Wang et al., 2010). Une rétroaction « par erreur » passive consiste à confronter les conducteurs à une situations contenant un danger, programmé de façon à ce que ce dernier soit difficile à éviter si il n'est pas anticipé (R. W. Allen et al., 2010). L'opérationnalisation de ces rétroactions dans notre travail observait 2 intérêts. En premier lieu, il s'agissait de la première fois à notre connaissance qu'une telle rétroaction n'était pas associée à une rétroaction différée supplémentaire. En second lieu, une telle approche permettait également d'améliorer la compréhension des mécanismes d'apprentissage expérientiel constatés dans l'étude 1. En effet, en confrontant des novices à des situations critiques sans explication supplémentaire, ils étaient placés dans un cadre similaire à celui rencontré durant les premiers mois d'autonomie. Nos résultats montrent cependant que ce type de rétroaction apparaît inefficace pour l'apprentissage des compétences perceptives et cognitives. En effet, sauf de façon marginale, nos résultats ne démontrent pas de différence entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs de la condition contrôle.

Une première piste d'explication de cette inefficacité concerne l'inadéquation entre cette approche et les principes d'efficacité des rétroactions formatives pour l'apprentissage. En effet, les rétroactions intradiégétiques sont simples. Elles ne fournissent pas plus que le résultat positif ou négatif de l'action. Elles ne fournissent pas non plus d'explication quant aux raisons de ce résultat et quant aux comportements adaptés pour l'éviter (Burkhardt, Cabon, et al., 2016; Shute, 2008; Van der Kleij et al., 2015). Ces rétroactions sont peu systématiques. L'environnement dynamique et complexe de l'approche « par simulateur » ne peut garantir que les apprenants soient réellement confrontés à des situations critiques pour l'apprentissage (Hirsch & Bellavance, 2017; Ivancic & Hesketh, 2000). Les apprenants peuvent par exemple éviter le presque accident en adoptant un style de conduite très prudent, en lien avec leur présence dans une situation d'expérimentation. Enfin, même si le conducteur se retrouve dans une situation risquée ou difficile, il n'y a pas de garantie que cette difficulté soit interprétée comme une remise en cause de ses propres compétences (Burkhardt, Cabon, et al., 2016). En effet, le conducteur peut attribuer l'occurrence de la situation aux contraintes expérimentales, ou au comportement de l'autre usager par exemple. Auquel cas, il pourrait ne pas démontrer une observation réflexive critique de ses compétences, pourtant nécessaire au développement des compétences (Fede et al., 2018; D. A. Kolb & Kolb, 2012; Morris, 2019).

Un point supplémentaire est que les caractéristiques des rétroactions intradiégétiques utilisées pourraient limiter la criticité de la situation pour l'apprentissage. L'étude 1 montre un lien fort entre la perception d'un risque ou d'une difficulté dans une situation et l'occurrence d'apprentissages. Or, Higél et al. (2011) indique qu'une partie non négligeable des situations à risques rencontrées par les conducteurs novices n'est pas perçue comme telle. Par conséquent, pour être efficace, une rétroaction intradiégétique doit être capable d'évoquer une difficulté et/ou un risque de manière indubitable chez le novice. Les rétroactions dans notre étude étaient présentées sous la forme d'un presque accident. Ce type d'approche est utilisée pour ne pas provoquer un état d'hyper vigilance chez le conducteur. En effet, cet état pourrait artificiellement améliorer les performances des conducteurs, sans qu'elles soient issues d'un

apprentissage (Vlakveld et al., 2011). Toutefois, une telle approche pourrait aussi limiter la criticité de la situation pour l'apprentissage. En effet, en diminuant sa sévérité, c'est à dire ses conséquences potentielles pour la santé des protagonistes, elle pourrait rendre la situation moins « saillante » pour le conducteur (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016). Un second paramètre concerne l'immersion du conducteur dans la simulation. En effet, en comparaison de la conduite réelle, le simulateur 3 écrans pourrait présenter un degré d'immersion trop faible pour que la situation presque accidentelle apparaisse suffisamment « risquée » au conducteur (R. W. Allen et al., 2010; Burkhardt, Lourdeaux, & Bardy, 2003).

10.2.3 La question de la distance du transfert pour l'apprentissage

Notre travail pose également la question de la distance de transfert en fonction de la variation des traits surface, entre des situations possédant la même structure. La structure désigne les traits de la situation qui définissent le danger potentiel dans la situation de conduite. La structure des situations couvertes implique ainsi qu'un danger soit caché derrière un élément de l'environnement. La structure des situations ouvertes implique quant à elle qu'un danger soit visible en amont, mais que son comportement puisse déclencher une situation dangereuse. Un trait de surface désigne les caractéristiques de la situation qui ne changent pas le type de danger. Dans les situations couvertes, il peut s'agir des particularités de l'élément cachant le danger. Ce dernier peut être potentiellement mobile, comme un camion devant un passage piéton, ou statique, comme une haie sur le bord de la route. Dans les situations ouvertes, il s'agit du comportement du danger potentiel. Il peut être statique, comme un piéton posté au bord de la route, ou mobile, comme une voiture arrivant à vive allure sur une voie adjacente. Toutefois, l'évaluation de la similarité inter-situation résiste jusqu'alors à une codification précise. Certains auteurs la qualifient même « d'intuitive [n'impliquant] pas de mesure stricte de la notion de similarité » (Perkins & Salomon, 1992, p.4).

Les résultats des études 2 et 3 permettent toutefois d'apporter quelques précisions quant à la mesure de la distance du transfert, au moins dans le cadre de l'apprentissage de la conduite. Prenons le cas de la situation couverte « haie », qui était une des situations d'évaluation de l'étude 2, et la situation de l'étude 3 ne possédant pas de traits de surface communs avec la situation d'apprentissage. Dans l'étude 2, cette situation n'apparaît maîtrisée que par les conducteurs expérimentés. Dans l'étude 3, malgré la formation, les conducteurs ne démontrent pas d'amélioration des performances dans cette situation. Ce n'est pas le cas de la situation « camion », qui était également une situation test de l'étude 2 et la situation test de l'étude 3 possédant l'ensemble de ses traits de surface en commun avec la situation d'apprentissage. A l'instar de la situation « haie » cette situation n'apparaît maîtrisée que par les conducteurs expérimentés dans l'étude 2. Toutefois, les conducteurs entraînés de l'étude 3 démontraient une nette amélioration des compétences dans cette situation en comparaison des conducteurs non-entraînés.

Une hypothèse pourrait être qu'un camion serait un élément plus saillant de l'environnement qu'une haie. En effet, la majorité des situations dangereuses rencontrées par les conducteurs impliquent un autre véhicule (Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; Seacrist et al., 2018). Par conséquent, les conducteurs pourraient être particulièrement attentif à la présence d'un tel élément dans l'environnement. Au contraire, les situations de type « haie » pourraient être rares, voire quasi inconnues. En effet, le code de la route français recommande une co-visibilité piéton-véhicule à partir de 30m avant n'importe quel passage piéton (Certu, 2010). De ce fait, elles pourraient également être moins traitées lors de la formation initiale.

Une hypothèse complémentaire serait que l'exposition à une unique situation critique possédant un jeu de traits de surface spécifique serait inefficace pour améliorer les compétences dans des situations de même structure, mais dont les traits de surface diffèrent. Les meilleures

performances des expérimentés dans l'étude 2 pourraient alors être expliquées par la plus grande diversité de leurs expériences de conduite. Ces derniers auraient en effet pu rencontrer de multiples situations couvertes par exemple, chacune caractérisée par des traits de surface différents. Une telle diversité pourrait avoir favorisé l'acquisition de multiples schémas de situation, permettant aux expérimentés d'adapter leur comportement plus efficacement dans des situations rares, en comparaison des novices. En conséquence, l'efficacité d'une formation aux compétences perceptives et cognitives de conduite pourrait dépendre de sa capacité à favoriser la rencontre entre le conducteur et des situations de conduites variées, notamment en termes de traits de surface.

10.2.4 Utilisation des simulateurs pour entraîner et évaluer les compétences de conduite

Nos travaux donnent des indications sur le type de simulateur à utiliser en fonction des objectifs de l'expérimentateur ou du formateur. Les résultats de l'étude 3 montrent qu'un simulateur base fixe à 3 écrans possède plusieurs avantages par rapport aux simulateurs pleine échelle pour la formation des compétences.

Un simulateur base fixe 3 écrans, utilisé dans l'étude 3, possède l'avantage de limiter les effets du mal du simulateur. En effet, lors de l'étude 2, qui utilisait un simulateur pleine échelle, 5 participants sur 49 n'ont pu effectuer aucune des situations test pour cause de mal du simulateur. Ces résultats rejoignent ceux d'autres travaux, qui indiquent que plus l'angle visuel d'immersion est élevé, plus le mal du simulateur est important (Kim et al., 2012; Tanaka & Takagi, 2004). En second lieu, ces simulateurs, moins coûteux et prenant moins de place que les simulateurs de moyenne et de haute-fidélité, seraient économiquement plus accessibles pour les structures d'enseignement de la conduite et de recherche.

Cependant, les simulateurs pleine échelle pourraient être les plus efficaces pour l'évaluation des compétences. En effet, ils proposent plusieurs avantages par rapport au simulateur 3 écrans (Klüver et al., 2016). En proposant un niveau d'immersion visuelle sur 360°, ils pourraient permettre d'accéder à des comportements inaccessibles en simulateur 3 écrans. Par exemple, l'excentricité importante du danger potentiel dans la situation ouverte de l'étude 2 permet d'observer des comportements de mouvements de tête en direction d'un objet potentiellement dangereux. D'autres comportements pourraient être potentiellement recueillis comme des fixations au niveau des rétroviseurs ou la gestion visuelle du tableau de bord. Par ailleurs, en proposant un habitacle complet, ils permettent également l'inclusion d'un ou plusieurs passagers, potentiellement utiles dans l'évaluation des compétences nécessaires à la gestion des pressions sociales et des distractions.

11 Limites, perspectives et conclusion

11.1 Limites

Plusieurs limites générales viennent nuancer les résultats de ce travail, tout en indiquant des pistes de recherche supplémentaires.

Une première limite concerne l'efficacité réelle de la formation en simulateur pour l'apprentissage des compétences. En effet, l'évaluation de l'apprentissage était effectuée en simulateur et seulement quelques minutes après l'entraînement. Par conséquent, nous sommes dans l'incapacité d'identifier si l'amélioration est momentanée, causée par une hausse de la vigilance due à l'entraînement, ou pérenne.

Une seconde limite concerne l'absence du point de vue des formateurs de la conduite dans la thèse. Or, ce point de vue aurait pu être utile à plusieurs égards. En premier lieu il aurait permis d'obtenir des informations sur l'utilisation réelle (nombre d'heures, compétences ciblées, situations d'apprentissage) du simulateur lors de la formation. En second lieu, il aurait permis d'orienter nos investigations et notre méthodologie sur la base de données en lien direct avec les problématiques rencontrées par les acteurs du domaine. En particulier, leur expertise des erreurs des conducteurs aurait pu fournir des pistes d'orientation et d'analyse enrichissantes, tant du point de vue des entretiens de l'étude 1, que des situations, indicateurs et rétroactions des études 2 et 3.

D'autres limites concernent l'inadaptation technique des simulateurs à la mesure des compétences, en particulier via l'utilisation d'indicateurs complexes. En effet, les simulateurs utilisés ne proposaient pas d'intégration des différents systèmes de mesure avec les systèmes de rendus graphiques ou de gestion logicielle des situations critiques (ex. timing du déclenchement du danger). Par exemple dans l'étude 2, le système d'acquisition des données oculométriques était séparé du point de vue matériel et logiciel du système gérant les situations de test. De ce fait, à l'instar de nombreux travaux (Crundall et al., 2012; Pradhan et al., 2005; Vlakveld et al., 2011), les données oculométriques ont du faire l'objet d'un traitement manuel lourd et complexe pour pouvoir être utilisées. Ce constat est encore plus sévère pour l'acquisition d'indicateurs combinés, pourtant efficaces pour l'évaluation des compétences perceptives et cognitives. Par exemple, la mesure du délai entre la détection du danger et le premier freinage subséquent demande un interfaçage fin entre les données acquises par l'oculomètre, les données du pédalier et le moteur de réalité virtuelle qui gère les événements dans la situation d'apprentissage. Un tel interfaçage a dû être effectué de manière manuelle dans l'étude 2. De telles limites techniques rendent par ailleurs impossible l'utilisation potentielle de nombreux autres indicateurs de mesure. Par exemple, des mesures physiologiques (conductance cutanée, rythme cardiaque) et des vidéos des comportements des pieds au niveau du pédalier n'ont pas pu être exploitées pour ces raisons.

11.2 Perspectives

11.2.1 Perspectives pour l'étude et l'entraînement des compétences de conduite de haut niveau

11.2.1.1 Efficacité et utilisation réelle des simulateurs pour la formation des compétences

L'étude 3 montre l'efficacité des rétroactions extradiégétiques pour améliorer au moins momentanément les compétences perceptives et cognitives. Une première piste de recherche concerne donc l'évaluation de l'efficacité réelle de cet apprentissage. Cette piste se déploierait selon deux étapes. Dans une première étape, il s'agirait d'évaluer si l'apprentissage proposé permet une amélioration à long terme des compétences. Une première approche serait donc longitudinale, et viserait à évaluer les compétences des conducteurs entraînés de façon régulière

et espacée dans le temps. Dans une seconde étape, si l'apprentissage apparaît pérenne, il s'agirait de tester l'effet de cette approche sur l'accidentalité des novices. L'approche extradiégétique pourrait être dispensée durant le cursus de formation d'un échantillon représentatif de conducteur novices. L'accidentalité de ces derniers serait comparée à l'accidentalité d'autres conducteurs n'ayant pas reçu l'apprentissage.

Par ailleurs, peu d'informations existent quant à l'utilisation réelle des simulateurs pour l'apprentissage des compétences de conduite de haut niveau dans la formation. Une perspective supplémentaire pourrait être de réaliser une enquête, sous la forme d'entretiens ou de questionnaires à destination des enseignants de la conduite. Cette enquête viserait à répondre aux questions suivantes : quelle proportion des écoles de conduite française utilise réellement un simulateur pour la formation des apprenants ? A quelles compétences l'utilisation du simulateur est-elle destinée dans ce cadre ? Plus précisément, le simulateur de conduite est-il utilisé à des fins d'entraînements des compétences techniques, ou pour favoriser le développement des compétences perceptives et cognitives et de haut niveau ? Un travail en ce sens a néanmoins été engagé via l'encadrement d'un étudiant de master 2. Il vise à effectuer une enquête auprès des enseignants concernant l'utilisation réelle du simulateur dans le cadre du cursus initial des apprenants conducteurs.

11.2.1.2 Apprentissage et évaluation des compétences de gestion des ressources personnelles

Une seconde piste de recherche concerne l'étude et l'entraînement des compétences de gestion des ressources personnelles. En effet, l'étude 1 montre que quelques situations de paniques ou d'endormissements au volant ont été recensées comme causant des situations difficiles ou à risques. Même minoritaires, ces situations présentent des taux d'accident très importants (Ge et al., 2014; Gulian et al., 1989; Weiss, Kaplan, & Prato, 2014; Williamson et al., 2014). Par exemple, un état de fatigue était relevé dans 25 % des accidents mortels sur les autoroutes françaises entre 2012-2016 (ONISR, 2017). Ainsi, si le rôle de ces facteurs apparaît bien connu, aucune étude à notre connaissance ne propose l'évaluation d'une formation destinée aux compétences de gestion des ressources personnelles. Or, des travaux montrent que les conducteurs novices diffèrent des conducteurs expérimentés essentiellement sur les stratégies à adopter pour gérer les états internes défaillants (Lucidi et al., 2006). Dans ce cadre, la sécurité du simulateur permettrait d'étudier l'effet de la fatigue ou du stress sur les conducteurs, et d'évaluer l'efficacité de formations dédiées à la gestion de ces états délétères.

De même, le rôle des émotions dans l'apprentissage des compétences de conduite de haut niveau est une perspective importante pour de futurs travaux. Dans l'étude 1, la majorité des situations d'apprentissage étaient associées à des émotions négatives. Le rôle des émotions a été peu investigué dans le cadre de l'apprentissage expérientiel (Moon, 2004; Morris, 2019). Pourtant, la présence d'une émotion pourrait favoriser l'apprentissage expérientiel. Ainsi, l'absence d'émotion associée à la situation critique pourrait être une piste d'explication de l'inefficacité des rétroactions intradiégétiques dans l'étude 3. Une possibilité serait de proposer des rétroactions intradiégétiques dans un cadre propice au déclenchement d'une émotion. Il pourrait s'agir de favoriser l'occurrence d'accidents par exemple, dans un simulateur pleine échelle voir à base mouvante qui renforcerait l'immersion du conducteur. Après le scénario test, un débriefing pourrait alors être proposé aux apprenants pour recueillir leurs émotions concernant la situation d'apprentissage. Si ces derniers rapportent davantage d'émotions négatives mais démontrent de meilleures performances, alors ces paramètres pourraient être centraux pour l'apprentissage des compétences perceptives et cognitives.

Une dimension importante est également celle de l'influence des passagers sur le conducteur novice. L'étude 1 montre que 50% des situations difficiles ou à risques étaient expérimentées en présence d'au moins un passager. Un conducteur de l'étude 1 indique ainsi

qu'il n'aurait pas tenté un dépassement dangereux sur autoroute si son passager ne lui avait dit « vas-y tu as le temps ». L'étude de l'influence négative des passagers sur la sécurité des conducteurs novices a notamment été observée selon l'aspect de l'influence et de la pression sociale (Chein et al., 2011; Gheorghiu et al., 2015; B. G. Simons-Morton et al., 2011; A. R. Smith, Chein, & Steinberg, 2014). Notamment, ces travaux ont montré qu'en présence d'un pair, les conducteurs novices étaient plus susceptibles d'adopter des comportements à risques. A notre connaissance, il n'existe pas de formation spécifique pour entraîner les compétences de gestion des pressions sociales. Pourtant, la réalité virtuelle propose un cadre idéal dans cet objectif. Sa flexibilité lui permet en effet d'inclure aisément un passager virtuel ou réel à la situation de conduite (Chein et al., 2011). Le couple conducteur-passager peut alors être confronté à des situations critiques diverses, tout en bénéficiant des systèmes de contrôle et de mesure propres à la simulation.

11.2.2 Perspectives et pistes d'améliorations des systèmes de réalité virtuelle pour l'évaluation et l'entraînement des compétences perceptives et cognitives

Du point de vue technique, une piste prometteuse pourrait être l'interfaçage technologique entre les différents systèmes utilisés pour l'apprentissage et l'évaluation des compétences en simulateur. Il s'agirait notamment de synchroniser les systèmes responsables de la gestion logicielle des situations de test et de rendu graphique, avec les systèmes d'acquisition des indicateurs oculométriques, d'allure et du pédalier. Un tel interfaçage permettrait de mesurer et d'analyser de façon moins lourde des indicateurs complexes ou combinées, tout en prenant en compte la temporalité de la situation test. Par exemple, l'acquisition d'indicateurs de délai entre la détection du danger et le premier freinage subséquent serait facilitée si une zone d'intérêt visuelle était directement insérée dans l'environnement 3D de la situation test (ex. le piéton dans une situation couverte). En effet, lors de la détection d'une fixation dans cette zone, le système pourrait calculer automatiquement la vitesse de cette détection, ainsi que le temps de réaction au freinage subséquent. Par ailleurs, un tel interfaçage permettrait aussi l'utilisation de systèmes d'acquisitions de mesures peu utilisés. Par exemple, il faciliterait l'utilisation de caméras pour observer les mouvements des pieds, des mains, ou de la tête. De tels indicateurs permettraient d'accéder à des comportements d'anticipation jusqu'alors jamais observés. Il faciliterait également l'utilisation de systèmes de mesures physiologiques, qui permettraient l'étude des effets du stress ou de la fatigue (Healey & Picard, 2005; N. A. D. Kinnear & Helman, 2013).

Enfin, accompagné de développements logiciels appropriés, un tel interfaçage permettrait de personnaliser les apprentissages en simulateurs. Une telle personnalisation peut être conçue en 3 étapes (Burkhardt, Corneloup, et al., 2016). En utilisant des indicateurs combinés préétablis, les compétences des conducteurs seraient diagnostiquées « en ligne », directement pendant la situation d'évaluation. Sur cette base, une rétroaction personnalisée, immédiate et extradiégétique pourrait être fournie à l'apprenant. Ce dernier recevrait une rétroaction élaborée, décrivant spécifiquement les erreurs commises et les comportements à adopter à l'avenir pour les éviter. Une fois l'entraînement reçu, le système confronterait alors l'apprenant à un scénario similaire ou proche, en faisant varier les traits de surface appropriés au test de l'efficacité de la rétroaction. Par exemple, le conducteur entraîné sur une situation test couverte « camion » pourrait être évalué automatiquement sur des situations test « bus » ou « haie ». Dans le cas où les compétences seraient évaluées comme insuffisantes dans la situation test, le système pourrait automatiquement fournir une nouvelle rétroaction personnalisée.

11.3 Conclusion et recommandations

Ce travail aborde la question de l'apprentissage des compétences de conduite de haut niveau, durant les premiers mois d'autonomie des conducteurs novices. Sur un versant

théorique, il avait pour objectif de contribuer à la compréhension des mécanismes d'apprentissage et de développement des compétences de conduite de haut niveau, durant les premiers mois de conduite autonome. Sur un versant applicatif, il avait comme objectif d'outiller la conception d'outils en réalité virtuelle pour mesurer et développer les compétences de conduite de haut niveau.

Sur le versant théorique, les études 1 et 3 permettent d'approfondir les connaissances concernant les mécanismes de l'apprentissage des compétences durant les premiers mois de conduite autonome. Ce dernier serait expérientiel et passerait par la rencontre de situations critiques, c'est-à-dire perçues comme difficiles ou risquées par les conducteurs. Cet apprentissage cible principalement les compétences perceptives et cognitives, par ailleurs principales responsables du surrisque des conducteurs novices (Deery, 1999; McKnight & McKnight, 2003). De même, les études 2 et 3 contribuent à la compréhension des compétences d'anticipation. Notamment, elles montrent la présence deux types de perception, active et passive, qui permettent respectivement de détecter les dangers pouvant être anticipé, et ceux ne pouvant pas l'être. Nous identifions également deux types de prise de décision anticipatoire. Une première s'exprime au niveau tactique et vise à réduire le risque durant les quelques secondes précédant l'arrivée sur un lieu potentiellement dangereux. La seconde consiste en l'amorçage d'une réponse comportementale, destinée à être délivrée rapidement au niveau opérationnel, si le danger anticipé apparaît réellement.

Sur le versant applicatif, les études 2 et 3 contribuent à l'outillage de la réalité virtuelle, tant pour l'évaluation que pour l'apprentissage des compétences. L'étude 2 permet de conclure à la pertinence de l'utilisation des indicateurs combinés pour mesurer précisément les compétences d'anticipation. Notamment, la mesure du délai entre la détection d'un danger et la manœuvre d'évitement subséquente permet de mesurer les compétences de prise de décision anticipatoire des conducteurs, par l'identification d'un amorçage comportemental. De même, la mesure du délai entre la dernière fixation sur l'élément cachant le danger et la détection de ce dernier permet d'évaluer les compétences de recherche visuelle anticipatoire des dangers potentiels. L'étude 3 permet de conclure à l'utilité des rétroactions extradiégétiques immédiates pour l'entraînement des compétences perceptives et cognitives en simulateur. A notre connaissance, de telles rétroactions n'avait jamais été utilisées pour l'apprentissage des compétences de conduite. Pourtant, elles apparaissent pratiques, légères, faciles à mettre en place et personnalisables. Elles possèdent donc les qualités idéales pour que leur utilisation soit étendue à l'apprentissage des compétences perceptives et cognitives dans le cadre de la formation à la conduite grand public.

En termes de recommandations, nos travaux soulèvent l'importance du développement précoce des compétences de conduite de haut niveau pour favoriser l'efficacité et la sécurité de la conduite. L'entraînement des conducteurs novices doit donc être global et concerner à la fois les compétences techniques, perceptives et cognitives, d'auto-évaluation et de gestion des ressources personnelles. Cette thèse s'inscrit dans un mouvement pour le développement d'une telle approche (Assailly, 2016b; Hatakka et al., 2002). Elle insiste également sur l'efficacité potentielle des technologies de réalité virtuelle dans cet objectif. Les simulateurs présentent en effet de nombreux intérêts en termes de sécurité et de flexibilité, tant dans l'articulation des apprentissages que dans la mise en place de l'évaluation, pour participer à l'accélération du développement des compétences de conduite. En conclusion, le problème de sur-accidentalité des conducteurs novices est complexe et multifactoriel. Si dans ce travail nous l'avons abordé par le biais de la formation aux compétences perceptives et cognitives, il nécessite une approche globale. Par approche globale, nous entendons une approche incluant l'ensemble des acteurs pour être résolu. Nous entendons également une approche considérant les compétences de conduite comme un tout cohérent, dont les interrelations sont fondamentales pour l'efficacité

de la sécurité de la conduite. Enfin, nous entendons une utilisation de l'ensemble des moyens d'apprentissage disponibles, au sein desquels les nouvelles technologies de réalité virtuelle et de simulation observent une place de choix.

Bibliographie

- Agrawal, R., Knodler, M., Fisher, D. L., & Samuel, S. (2017). Advanced Virtual Reality Based Training to Improve Young Drivers' Latent Hazard Anticipation Ability. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 2017 Annual Meeting*, (October), 1995–1999. <https://doi.org/10.1177/1541931213601994>
- Allen, J. P., & Brown, B. B. (2008). Adolescents, peers, and motor vehicles: the perfect storm? *American Journal of Preventive Medicine*, 35(3 Suppl), S289-93. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.06.017>
- Allen, R. W., Park, G., Cook, M., Fiorentino, D., & Viirre, E. (2003). Novice Driver Training Results and Experience with a PC Based Simulator. In *Proceedings of the 2nd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design: Driving Assessment 2003* (pp. 165–170). Iowa City, Iowa: University of Iowa. <https://doi.org/10.17077/drivingassessment.1115>
- Allen, R. W., Park, G. D., & Cook, M. L. (2010). Simulator Fidelity and Validity in a Transfer-of-Training Context. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2185(1), 40–47. <https://doi.org/10.3141/2185-06>
- Allen, R. W., Park, G. D., Cook, M. L., & Fiorentino, D. (2007). The effect of driving simulator fidelity on training effectiveness. In *Driving Simulator Conference* (pp. 1–15). Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=899884>
- Allen, R. W., Park, G., Terrace, S., & Grant, J. (2011). Detecting Transfer of Training Through Simulator Scenario Design: A Novice Driver Training Study. In *Proceedings of the 6th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design : driving assessment 2011* (pp. 203–210). Iowa City, Iowa: University of Iowa. <https://doi.org/10.17077/drivingassessment.1398>
- Allen, R. W., Rosenthal, T. J., Park, G., Cook, M., Fiorentino, D., & Viirre, E. (2003). Experience with a low cost PC-based system for young driver training. In *International Conference on Driver Behaviour and Training* (Vol. 1, pp. 349–357). Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1158188>
- Allen, T. M., Lunenfeld, H., & Alexander, G. J. (1971). Driver Information Needs. *Highway Research Record*, 366, 102–115. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=116960>
- Amado, S., Arian, E., Kaça, G., Koyuncu, M., & Turkan, B. N. (2014). How accurately do drivers evaluate their own driving behavior? An on-road observational study. *Accident Analysis and Prevention*, 63, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.10.022>
- Amalberti, R. (1996). *La conduite des systèmes à risques*. (PUF, Ed.), *Le Travail Humain*.
- Anderson, J. R. (1983). *The Architecture of Cognition*, 345 pages. Retrieved from <https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00699788/>
- Anderson, R. C., Kulhavy, R. W., & Andre, T. (1971). Feedback procedures in programmed instruction. *Journal of Educational Psychology*, 62(2), 148–156. <https://doi.org/10.1037/h0030766>
- Arnett, J. J., Offer, D., & Fine, M. A. (1997). Reckless driving in adolescence: “State” and “trait” factors. *Accident Analysis and Prevention*, 29(1), 57–63. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(97\)87007-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(97)87007-8)
- Assailly, J.-P. (2010). *la psychologie du risque* (Lavoisier). Paris.

- Assailly, J.-P. (2013). Quelles innovations pédagogiques dans le cadre de la réforme du permis de conduire ? *Questions Vives Recherches En Éducation*, 7(Vol.9 n°19), 37–49. <https://doi.org/10.4000/questionsvives.1268>
- Assailly, J.-P. (2016a). Comment appliquer la matrice GDE ? Quelles adaptations aux facteurs de risque d'accidents des jeunes conducteurs novices ? *Rech. Transp. Secur.*, 2016(1–2), 69–80. <https://doi.org/10.4074/S0761898016002077>
- Assailly, J.-P. (2016b). Comment appliquer la matrice GDE ? Quelles adaptations aux facteurs de risque d'accidents des jeunes conducteurs novices ? Which pedagogical innovations in the improvement of the licensing process ? How to apply the GDE matrix ? How is it adapted to the, 1–12.
- Assailly, J.-P., Burkhardt, J.-M., Cabon, P., Cestac, J., Chung, A., Corneloup, V., ... Senac, C. (2016). *ANR MacCoy Critical : Rapport de synthèse final décrivant les compétences non techniques et des situations dans lesquelles elles sont réellement mises en oeuvre.*
- Bangert-Drowns, R. L., Kulik, C.-L. C., Kulik, J. A., & Morgan, M. (1991). The Instructional Effect of Feedback in Test-Like Events. *Review of Educational Research*, 61(2), 213–238. <https://doi.org/10.3102/00346543061002213>
- Barré, J., Benabbou, A., Bourrier, Y., Corneloup, V., & Job, A. (2017). Simulation et réalité virtuelle pour l'apprentissage des compétences non techniques en conduite et en médecine d'urgence. *Actes, 12ème Journées de l'AFRV*, 1–7. Retrieved from <https://halshs.archives-ouvertes.fr/LIG/hal-01681378v1>
- Beanland, V., Goode, N., Salmon, P. M., & Lennon, M. G. (2013). Is there a case for driver training? A review of the efficacy of pre- and post-licence driver training. *Safety Science*, 51(1), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.06.021>
- Bjørnskau, T., & Sagberg, F. (2005). What Do Novice Drivers Learn During the First Months of Driving? Improved Handling Skills or Improved Road User Interaction? In J. Underwood (Ed.), *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application. Proceedings of the ICTTP 2004* (pp. 129–140). Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=760158>
- Black, P., & Wiliam, D. (1998). Assessment and Classroom Learning. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice*, 5(1), 7–74. <https://doi.org/10.1080/0969595980050102>
- Blana, E. (1996). *A Survey of Driving Research Simulators Around The World. Institute for Transport Studies* (Vol. 110).
- Boccaro, V. (2011). Développement des compétences en situation de tutelle au cours de la formation initiale la conduite automobile. <Http://Www.Theses.Fr>. Retrieved from <https://www.theses.fr/2011PA083445>
- Boccaro, V., Delhomme, P., Vidal-Gomel, C., & Rogalski, J. (2011). Time course of driving-skill self-assessments during French driver training. *Accident Analysis and Prevention*, 43(1), 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.08.016>
- Borowsky, A., Shinar, D., & Oron-Gilad, T. (2010). Age, skill, and hazard perception in driving. *Accident Analysis & Prevention*, 42(4), 1240–1249. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.02.001>
- Bouteiller, J. (2009). *La refonte de la filière de formation professionnelle des enseignants de la conduite et de la sécurité routière.* Retrieved from <http://www.cereq.fr/cereq/netdoc58.pdf>

- Braitman, K. A., Kirley, B. B., McCartt, A. T., & Chaudhary, N. K. (2008). Crashes of novice teenage drivers: Characteristics and contributing factors. *Journal of Safety Research*, 39(1), 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.12.002>
- Brehmer, B. (1994). Psychological aspects of traffic safety. *European Journal of Operational Research*, 75(3), 540–552. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90295-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90295-X)
- Briggs, G. F., Hole, G. J., & Land, M. F. (2011). Emotionally involving telephone conversations lead to driver error and visual tunnelling. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(4), 313–323. <https://doi.org/10.1016/J.TRF.2011.02.004>
- Brijs, K., Cuenen, A., Brijs, T., Ruiters, R. A. C., & Wets, G. (2014). Evaluating the effectiveness of a post-license education program for young novice drivers in Belgium. *Accident Analysis and Prevention*, 66, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.01.015>
- Brown, I. D., & Groeger, J. A. (1988). Risk perception and decision taking during the transition between novice and experienced driver status. *Ergonomics*, 31(4), 585–597. <https://doi.org/10.1080/00140138808966701>
- Bruce, B., & Bloch, N. (2012). Learning by doing. In N. Seel (Ed.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning*. (Seel, N. M). Springer US.
- Burkhardt, J.-M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le Travail Humain*, 65–91.
- Burkhardt, J.-M., Cabon, P., Corneloup, V., Delgoulet, C., Jambon, F., Luengo, V., & Lourdeaux, D. (2016). *ANR McCoy Critical: Rapport d'état de l'art sur les systèmes de diagnostic, d'évaluation et de gestion des observables dans un environnement d'apprentissage, de gestion des rétroactions, et de leur positionnement par rapport aux caractéristiques du p*. Paris. Retrieved from <https://maccoy.hds.utc.fr/>
- Burkhardt, J.-M., Corneloup, V., Garbay, C., Bourrier, Y., Jambon, F., Luengo, V., ... Lourdeaux, D. (2016). Simulation and virtual reality-based learning of non-technical skills in driving: critical situations, diagnostic and adaptation. *IFAC-PapersOnLine*, 49(32), 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.191>
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Bardy, B. (2003). Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des Environnements Virtuels. *Psychologie Française*, 35–42.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Mellet-D'Huart, D. (2003). La conception des environnements virtuels pour l'apprentissage. In *Le traité de la réalité virtuelle*. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01434545>
- Butterfield, L. D. (2005). Fifty years of the critical incident technique: 1954-2004 and beyond. *Qualitative Research*, 5(4), 475–497. <https://doi.org/10.1177/1468794105056924>
- Cabon, P., Corneloup, V., Job, A., & Burkhardt, J.-M. (2016). *ANR MacCoy Critical : Situations d'apprentissage et simulateurs*.
- Caird, J. K., Simmons, S. M., Wiley, K., Johnston, K. A., & Horrey, W. J. (2018). Does Talking on a Cell Phone, With a Passenger, or Dialing Affect Driving Performance? An Updated Systematic Review and Meta-Analysis of Experimental Studies. *Human Factors*, 60(1), 101–133. <https://doi.org/10.1177/0018720817748145>
- Casey, B. J., Getz, S., & Galvan, A. (2008). The adolescent brain. *Developmental Review*, 28(1), 62–77. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2007.08.003>
- Cecchi, A. (2010). Diegetic versus nondiegetic: a reconsideration of the conceptual opposition as a contribution to the theory of audio-vision. *Worlds of Audio-Vision*. Retrieved from

http://www-5.unipv.it/wav/pdf/WAV_Cecchi_2010_eng.pdf

- Certu. (2010). Les traversées des piétons, 1–4.
- Cestac, J., Paran, F., & Delhomme, P. (2011). Young drivers' sensation seeking, subjective norms, and perceived behavioral control and their roles in predicting speeding intention: How risk-taking motivations evolve with gender and driving experience. *Safety Science*, *49*(3), 424–432. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.10.007>
- Chapman, P. R., & Underwood, G. (1998). Visual search of driving situations: Danger and experience. *Perception*, *27*(Yarbus 1967), 951–964. <https://doi.org/10.1068/p270951>
- Chein, J., Albert, D., O'Brien, L., Uckert, K., & Steinberg, L. (2011). Peers increase adolescent risk taking by enhancing activity in the brain's reward circuitry. *Developmental Science*, *14*(2), F1–F10. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01035.x>
- Classen, S., Bewernitz, M., & Shechtman, O. (2011). Driving simulator sickness: An evidence-based review of the literature. *American Journal of Occupational Therapy*, *65*(2), 179–188. <https://doi.org/10.5014/ajot.2011.000802>
- Cobb, S. V. G., Nichols, S., Ramsey, A., & Wilson, J. R. (1999). Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE). *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *8*(2), 169–186. <https://doi.org/10.1162/105474699566152>
- Collange, O., & McKenna, J. (2013). Éthique et simulation en santé. In *La simulation en santé De la théorie à la pratique* (pp. 177–183). Paris: Springer Paris. https://doi.org/10.1007/978-2-8178-0469-9_20
- Cox, S. M., Cox, D. J., Kofler, M. J., Moncrief, M. A., Johnson, R. J., Lambert, A. E., ... Reeve, R. E. (2015). Driving Simulator Performance in Novice Drivers with Autism Spectrum Disorder : The Role of Executive Functions and Basic Motor Skills. *Journal of Autism and Developmental Disorders*. <https://doi.org/10.1007/s10803-015-2677-1>
- Cox, C. V., Wharam, R., Mouran, R., & Cox, D. J. (2009). Does Virtual Reality Driving Simulation Training Transfer to On-Road Driving in Novice Drivers? A Pilot Study. *Chronicle of the American Driver and Traffic Safety Education Association*, *57*(1). Retrieved from <https://trid.trb.org/view/917445>
- Crundall, D. (2016). Hazard prediction discriminates between novice and experienced drivers. *Accident Analysis & Prevention*, *86*, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.10.006>
- Crundall, D., Andrews, B., van Loon, E., & Chapman, P. (2010). Commentary training improves responsiveness to hazards in a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, *42*(6), 2117–2124. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2010.07.001>
- Crundall, D., Chapman, P., Phelps, N., & Underwood, G. (2003). Eye movements and hazard perception in police pursuit and emergency response driving. *Journal of Experimental Psychology. Applied*, *9*(3), 163–174. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.9.3.163>
- Crundall, D., Chapman, P., Trawley, S., Collins, L., van Loon, E., Andrews, B., & Underwood, G. (2012). Some hazards are more attractive than others: Drivers of varying experience respond differently to different types of hazard. *Accident Analysis & Prevention*, *45*, 600–609. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.049>
- Crundall, D., & Underwood, G. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, *41*(4), 448–458. <https://doi.org/10.1080/001401398186937>
- Crundall, D., Underwood, G., & Chapman, P. (1999). Driving experience and the functional

- field of view. *Perception*, 28(9), 1075–1087. <https://doi.org/10.1068/p2894>
- Crundall, D., Underwood, G., & Chapman, P. (2002). Attending to the peripheral world while driving. *Applied Cognitive Psychology*, 16(4), 459–475. <https://doi.org/10.1002/acp.806>
- Cuevas, H., & Aguiar, M. (2017). Assessing Situation Awareness in Unmanned Aircraft Systems Operations. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 4(4). <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2017.1176>
- Curry, A. E., Hafetz, J., Kallan, M. J., Winston, F. K., & Durbin, D. R. (2011). Prevalence of teen driver errors leading to serious motor vehicle crashes. *Accident; Analysis and Prevention*, 43(4), 1285–1290. <https://doi.org/DOI: 10.1016/j.aap.2010.10.019>
- Curry, A. E., Metzger, K. B., Williams, A. F., & Tefft, B. C. (2017). Comparison of older and younger novice driver crash rates: Informing the need for extended Graduated Driver Licensing restrictions. *Accident Analysis & Prevention*, 108(August), 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.08.015>
- Curry, A. E., Mirman, J. H., Kallan, M. J., Winston, F. K., & Durbin, D. R. (2012). Peer passengers: how do they affect teen crashes? *The Journal of Adolescent Health : Official Publication of the Society for Adolescent Medicine*, 50(6), 588–594. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2011.10.016>
- Curry, A. E., Pfeiffer, M. R., Durbin, D. R., & Elliott, M. R. (2015). Young driver crash rates by licensing age, driving experience, and license phase. *Accident Analysis and Prevention*, 80, 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.04.019>
- Curry, R., Artz, B., Cathey, L., Grant, P., & Greenberg, J. (2002). Kennedy SSQ results: fixed- vs. motion-based Ford simulators. *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'02)*, 289–300.
- Dahl, R. E. (2008). Biological, Developmental, and Neurobehavioral Factors Relevant to Adolescent Driving Risks. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(3 SUPPL.), 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.06.013>
- Damasio, A. (1994). Descartes' error: Emotion, rationality and the human brain. *New York: Putnam*. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2010.06.007>
- De Craen, S., Twisk, D. A. M. M., Hagenzieker, M. P., Elffers, H., & Brookhuis, K. a. (2011). Do young novice drivers overestimate their driving skills more than experienced drivers? Different methods lead to different conclusions. *Accident Analysis and Prevention*, 43(5), 1660–1665. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.03.024>
- Deery, H. A. (1999). Hazard and Risk Perception among Young Novice Drivers. *Journal of Safety Research*, 30(4), 225–236. [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(99)00018-3)
- Deffenbacher, J. L., Lynch, R. S., Oetting, E. R., & Yingling, D. A. (2001). Driving anger: Correlates and a test of state-trait theory. *Personality and Individual Differences*, 31(8), 1321–1331. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(00\)00226-9](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(00)00226-9)
- Diehl, E., & Serman, J. D. (1995). Effects of feedback complexity on dynamic decision making. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. <https://doi.org/10.1006/obhd.1995.1043>
- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J. D., ... Knippling, R. R. (2006). *The 100-Car naturalistic driving study phase II – Results of the 100-Car field experiment*. DOT HS 810 593. <https://doi.org/DOT HS 810 593>
- Divekar, G., Pradhan, A. K., Masserang, K. M., Reagan, I., Pollatsek, A., & Fisher, D. L.

- (2013). A simulator evaluation of the effects of attention maintenance training on glance distributions of younger novice drivers inside and outside the vehicle. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 20, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.07.004>
- Doshi, A., & Trivedi, M. M. (2009). On the roles of eye gaze and head dynamics in predicting driver's intent to change lanes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(3), 453–462. <https://doi.org/10.1109/TITS.2009.2026675>
- Dubois, S., Mullen, N., Weaver, B., & Bédard, M. (2015). The combined effects of alcohol and cannabis on driving: Impact on crash risk. *Forensic Science International*, 248, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.12.018>
- Duell, N., Steinberg, L., Chein, J., Al-Hassan, S. M., Bacchini, D., Lei, C., ... Alampay, L. P. (2016). Interaction of reward seeking and self-regulation in the prediction of risk taking: A cross-national test of the dual systems model. *Developmental Psychology*, 52(10), 1593–1605. <https://doi.org/10.1037/dev0000152>
- Durso, F. T., & Dattel, A. R. (2004). SPAM: The Real-Time Assessment of SA. *A Cognitive Approach to Situation Awareness: Theory, Measures and Application*. Ashgate.
- Endsley, M. R. (1988). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). *Aerospace and Electronics Conference, 1988. NAECON 1988., Proceedings of the IEEE 1988 National*, 789–795. <https://doi.org/10.1109/NAECON.1988.195097>
- Endsley, M. R. (1995a). Measurement of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 65–84. <https://doi.org/10.1518/001872095779049499>
- Endsley, M. R. (1995b). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 32–64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>
- Endsley, M. R. (2015a). Final reflections: Situation awareness models and measures. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 9(1), 101–111. <https://doi.org/10.1177/1555343415573911>
- Endsley, M. R. (2015b). Situation Awareness Misconceptions and Misunderstandings. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 9(1). <https://doi.org/10.1177/1555343415572631>
- Falkmer, T., & Gregersen, N. P. (2003). The TRAINER project: the evaluation of a new simulator-based driver training methodology. In *International Conference on Driver Behaviour and Training, 1st, 2003, Stratford-Upon-Avon, United Kingdom*. Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1158185>
- Falzon, P., Weill-Fassina, A., & Pastré, P. (2014). 13. Les compétences professionnelles et leur développement. *Ergonomie*, 213. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0213>
- Fan, Z. (2015). Research and Development of Visual Systems Software in Automobile Driving Training Simulator. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Management, Education, Information and Control* (pp. 310–315). Paris, France: Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/meici-15.2015.57>
- Fede, J. H., Gorman, K. S., & Cimini, M. E. (2018). Student Employment as a Model for Experiential Learning. *Journal of Experiential Education*, 41(1), 107–124. <https://doi.org/10.1177/1053825917747902>

- Feng, G. (2003). From eye movement to cognition: Toward a general framework of inference comment on Liechty et al., 2003. *Psychometrika*, 68(4), 551–556. <https://doi.org/10.1007/BF02295610>
- Fisher, D. L. (2011). *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. Taylor & Francis Group.
- Fisher, D. L., Knodler, M., & Samuel, S. (2017). Accelerating Teen Driver Learning : Anywhere , Anytime Training, (June), 1–34.
- Fisher, D. L., Laurie, N. E., Glaser, R., Connerney, K., Pollatsek, A., Duffy, S. A., & Brock, J. (2002). Use of a fixed-base driving simulator to evaluate the effects of experience and PC-based risk awareness training on drivers' decisions. *Human Factors*, 44(2), 287–302. <https://doi.org/10.1518/0018720024497853>
- Fisher, D. L., Pollatsek, A., & Pradhan, A. K. (2006). Can novice drivers be trained to scan for information that will reduce their likelihood of a crash? *Injury Prevention : Journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention*, 12 Suppl 1, i25–i29. <https://doi.org/10.1136/ip.2006.012021>
- Fisher, D. L., Pradhan, A. K., Pollatsek, A., & Knodler, M. A. (2007). Empirical Evaluation of Hazard Anticipation Behaviors in the Field and on Driving Simulator Using Eye Tracker. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2018(1), 80–86. <https://doi.org/10.3141/2018-11>
- Flanagan, J. C. (1954). The critical incident technique. *Psychological Bulletin*, 51(4), 327–358. <https://doi.org/10.1037/h0061470>
- Flin, R., & Maran, N. (2015). Basic concepts for crew resource management and non-technical skills. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 29(1), 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2015.02.002>
- Flin, R., O'Connor, P., & Crichton, M. (2008). *Safety at the Sharp End* (Ashgate). Retrieved from <http://www.ashgate.com/isbn/9780754646006>
- Frese, M. (1995). Error Management in Training: Conceptual and Empirical Results. In *Organizational Learning and Technological Change* (pp. 112–124). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79550-3_7
- Fuller, R. (1984). A conceptualization of driving behaviour as threat avoidance. *Ergonomics*, 27(11), 1139–1155. <https://doi.org/10.1080/00140138408963596>
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2004.11.003>
- Garay-Vega, L., Fisher, D. L., & Pollatsek, A. (2007). Hazard Anticipation of Novice and Experienced Drivers: Empirical Evaluation on a Driving Simulator in Daytime and Nighttime Conditions. *Transportation Research Record*, 2009(1), 1–7. <https://doi.org/10.3141/2009-01>
- Ge, Y., Qu, W., Jiang, C., Du, F., Sun, X., & Zhang, K. (2014). The effect of stress and personality on dangerous driving behavior among Chinese drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 73, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.07.024>
- Gheorghiu, A., Delhomme, P., & Felonneau, M. L. (2015). Peer pressure and risk taking in young drivers' speeding behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 35, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.10.014>
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive*

Psychology, 15(1), 1–38. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(83\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0010-0285(83)90002-6)

- Gicquel, R. (2004). *Utilisation pédagogique des simulateurs: Volet 1: éclairages de la didactique*.
- Goode, N., Salmon, P. M., & Lenné, M. G. (2013). Simulation-based driver and vehicle crew training: Applications, efficacy and future directions. *Applied Ergonomics*, 44(3), 435–444. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2012.10.007>
- Government Queensland. (2005). *Queensland youth on the road and in control, Discussion Paper*. Retrieved from https://www.tmr.qld.gov.au/-/media/Licensing/Learning-to-drive/Young-drivers/Pdf_young_drivers_discussion_paper_v2.pdf?la=en
- Green, M. (2000). How Long Does It Take to Stop? Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. *Transportation Human Factors*, 2(3), 195–216. https://doi.org/10.1207/STHF0203_1
- Green, P. (2013). Standard definitions for driving measures and statistics. *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '13*, 184–191. <https://doi.org/10.1145/2516540.2516542>
- Gregersen, N. P. (1996). Young drivers' overestimation of their own skill—an experiment on the relation between training strategy and skill. *Accident Analysis & Prevention*, 28(2), 243–250. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(95\)00066-6](https://doi.org/10.1016/0001-4575(95)00066-6)
- Gregersen, N. P., Berg, H.-Y., Engström, I., Nolén, S., Nyberg, A., & Rimmö, P.-A. (2000). Sixteen years age limit for learner drivers in Sweden--an evaluation of safety effects. *Accident; Analysis and Prevention*, 32(1), 25–35. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(99\)00045-7](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00045-7)
- Grumbach, A., & Klinger, É. (2007). Virtuel et Cognition – Introduction au dossier. *Intellectica*, 45(1), 7–22. <https://doi.org/10.3406/intel.2007.1264>
- Guého, L., Granié, M. A., & Abric, J. C. (2014). French validation of a new version of the Driver Behavior Questionnaire (DBQ) for drivers of all ages and level of experiences. *Accident Analysis and Prevention*, 63, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.10.024>
- Gugerty, L. J. (1997). Situation awareness during driving: Explicit and implicit knowledge in dynamic spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3(1), 42–66. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.3.1.42>
- Gugerty, L. J. (2011). Situation awareness in driving. In CRC Press (Ed.), *Handbook for driving simulation in engineering, Medicine and Psychology* (pp. 265–272). <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
- Gulian, E., Matthews, G., Glendon, A. I., Davies, D. R., & Debney, L. M. (1989). Dimensions of driver stress. *Ergonomics*, 32(6), 585–602. <https://doi.org/10.1080/00140138908966134>
- Guo, F., Klauer, S. G., Hankey, J. M., & Dingus, T. A. (2010). Near Crashes as Crash Surrogate for Naturalistic Driving Studies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2147(1), 66–74. <https://doi.org/10.3141/2147-09>
- Guo, F., Simons-Morton, B. G., Klauer, S. E., Ouimet, M. C., Dingus, T. A., & Lee, S. E. (2013). Variability in crash and near-crash risk among novice teenage drivers: A naturalistic study. *Journal of Pediatrics*, 163(6), 1670–1676. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2013.07.025>
- Hamid, M., Samuel, S., Borowsky, A., Horrey, W. J., & Fisher, D. L. (2016). Evaluation of

- Training Interventions to Mitigate Effects of Fatigue and Sleepiness on Driving Performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp 30–38. <https://doi.org/10.3141/2584-05>
- Hankey, J. M. (1996). *Unalerted Emergency Avoidance at an Intersection and Possible Implications for ABS Implementation*. *Industrial Engineering*. Retrieved from <https://elibrary.ru/item.asp?id=5417177>
- HAS. (2012). *Évaluation et amélioration des pratiques Guide de bonnes pratiques en matière de simulation en santé*. Paris. Retrieved from https://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2013-01/guide_bonnes_pratiques_simulation_sante_format2clics.pdf
- Hatakka, M., Keskinen, E., Gregersen, N. P., Glad, A., & Hernetkoski, K. (2002). From control of the vehicle to personal self-control; broadening the perspectives to driver education. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(3), 201–215. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(02\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(02)00018-9)
- Hatfield, J., Murphy, S., Kasparian, N., & Job, R. F. S. (2005). *Risk Perceptions, Attitudes, and Behaviours Regarding Driver Fatigue in NSW Youth: The Development of an Evidence-Based Driver Fatigue Educational Intervention Strategy*. *Acute Care*. Retrieved from <http://www.irmrc.unsw.edu.au/documents/interventionstrategyreport.pdf>
- Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The Power of Feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81–112. <https://doi.org/10.3102/003465430298487>
- Healey, J. A., & Picard, R. W. (2005). Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(2), 156–166. <https://doi.org/10.1109/TITS.2005.848368>
- Higelé, P., Sieffer, N., & Hernja, G. (2011). Analyse qualitative des pratiques pédagogiques des enseignants de la conduite et de l'effet de l'expérience du métier. *Recherche Transports Sécurité*, 27(1), 19–33. <https://doi.org/10.1007/s13547-010-0004-y>
- Hirsch, P., & Bellavance, F. (2016). Pilot Project to Validate the Transfer of Training of Driving Skills Learned on a High Fidelity Driving Simulator to On-Road Driving Pilot Project to Validate the Transfer of Training of Driving Skills Learned on a High Fidelity Driving Simulator to On-Ro, (April).
- Hirsch, P., & Bellavance, F. (2017). Transfer of Skills Learned on a Driving Simulator to On-Road Driving Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2660(1), 1–6. <https://doi.org/10.3141/2660-01>
- Hittner, J. B., & Swickert, R. (2006). Sensation seeking and alcohol use: A meta-analytic review. *Addictive Behaviors*, 31(8), 1383–1401. <https://doi.org/10.1016/j.addbeh.2005.11.004>
- Hoareau, C. (2016). Elaboration et évaluation de recommandations ergonomiques pour le guidage de l'apprenant en EVAH : application à l'apprentissage de procédure dans le domaine biomédical, 266.
- Hoc, J., & Amalberti, R. (2005). Modeling natural Decision-Making cognitive activities in Dynamic Decisions: The Role of a Coding Scheme. In *How professionals make decision*.
- Holyoak, K. J., & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & Cognition*, 15(4), 332–340. <https://doi.org/10.3758/BF03197035>
- Hoskovec, J., & Stikar, J. (1971). VALIDITY OF DRIVER SIMULATOR TRAINING.

- Ceskoslovenska Psychologie*, 15(2). Retrieved from <https://trid.trb.org/view/138603>
- Hoyos, C. G. (1988). Mental load and risk in traffic behaviour. *Ergonomics*, 31(4), 571–584. <https://doi.org/10.1080/00140138808966700>
- Huisingh, C., Griffin, R., & McGwin, G. (2015). The Prevalence of Distraction Among Passenger Vehicle Drivers: A Roadside Observational Approach. *Traffic Injury Prevention*, 16(2), 140–146. <https://doi.org/10.1080/15389588.2014.916797>
- Isen, A. M. (1993). Positive affect and decision making. In *Handbook of emotions*. (pp. 261–277). New York, NY, US: Guilford Press.
- Ivancic, K., & Hesketh, B. (2000). Learning from errors in a driving simulation: effects on driving skill and self-confidence. *Ergonomics*, 43(12), 1966–1984. <https://doi.org/10.1080/00140130050201427>
- Izquierdo, L., & Izquierdo, S. (2012). Reinforcement learning. In N. M. Seel (Ed.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning*. Springer US. Retrieved from https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-4419-1428-6_567.pdf
- Jelmer, J. J., & Slob, J. J. (2008). State-of-the-Art driving simulators, a literature survey. *DCT Report*, (August), 19. Retrieved from <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/9611.pdf>
- Jeong, M., Tashiro, M., Singh, L. N., Yamaguchi, K., Horikawa, E., Miyake, M., ... Itoh, M. (2006). Functional brain mapping of actual car-driving using [18F]FDG- PET. *Annals of Nuclear Medicine*, 20(9), 623–628. <https://doi.org/10.1007/BF02984660>
- Johansson, G., & Rumar, K. (1971). Drivers' Brake Reaction Times. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 13(1), 23–27. <https://doi.org/10.1177/001872087101300104>
- Johnson, J. G., & Raab, M. (2003). Take The First: Option-generation and resulting choices. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 91(2), 215–229. [https://doi.org/10.1016/S0749-5978\(03\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0749-5978(03)00027-X)
- Jones, B. (1993). *The Effectiveness of Skid-Car Training for Teenage Novice Drivers in Oregon*. Salem, Oregon.
- Kahneman, D. (2011). Thinking, fast and slow.
- Kappé, B., de Penning, L., Marsman, M., & Roelofs, E. (2009). Assessment in driving simulators: Where we are and where we go. In *Proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. (pp. 183–190).
- Kappé, B., & Emmerik, M. (2005). *The Use of Driving Simulators for Initial Driver Training and Testing*.
- Katila, A., Keskinen, E., & Hatakka, M. (1996). Conflicting goals of skid training. *Accident Analysis & Prevention*, 28(6), 785–789. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(96\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(96)00045-0)
- Katila, A., Keskinen, E., Hatakka, M., & Laapotti, S. (2004). Does increased confidence among novice drivers imply a decrease in safety? The effects of skid training on slippery road accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 36(4), 543–550. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(03\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(03)00060-5)
- Kearney, J., & Grechkin, T. F. (2011). Scenario Authoring. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, & J. D. Lee (Eds.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (pp. 6-1 ; 6–12). Taylor & Francis Group. Retrieved from

<https://trid.trb.org/view/1114405>

- Keating, D. P. (2007). Understanding adolescent development: Implications for driving safety. *Journal of Safety Research*, 38(2), 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.02.002>
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Kim, K., Rosenthal, M. Z., Zielinski, D., & Brady, R. (2012). Comparison of desktop, head mounted display, and six wall fully immersive systems using a stressful task. *Proceedings - IEEE Virtual Reality*, 143–144. <https://doi.org/10.1109/VR.2012.6180922>
- Kinnear, N. A. D., & Helman, S. (2013). Updating Risk Allostasis Theory to Better Understand Behavioural Adaptation. *Behavioural Adaptation and Road Safety*, 87–110. <https://doi.org/doi:10.1201/b14931-9>
- Kinnear, N., Kelly, S. W., Stradling, S., & Thomson, J. (2013). Understanding how drivers learn to anticipate risk on the road: A laboratory experiment of affective anticipation of road hazards. *Accident Analysis and Prevention*, 50, 1025–1033. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.08.008>
- Kirby, J. T. (1991). Mimesis and diegesis, foundations of aesthetic theory in plato and aristotle. *Helios*, 18(2), 113–128.
- Klauer, S. G., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. D., & Ramsey, D. J. (2006). The Impact of Driver Inattention On Near Crash/Crash Risk: An Analysis Using the 100-Car Naturalistic Driving Study Data. *Analysis*, 594(April), 226. <https://doi.org/DOT HS 810 594>
- Klein, G. A. (1993). A recognition-primed decision (RPD) model of rapid decision making. *Decision Making in Action: Models and Methods*, 138–147. <https://doi.org/10.1002/bdm.3960080307>
- Klein, G. A. (2008). Naturalistic Decision Making. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 456–460. <https://doi.org/10.1518/001872008X288385>
- Klein, G. A., Calderwood, R., & Clinton-Cirocco, A. (1986). Rapid Decision Making on the Fire Ground. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 30(6), 576–580. <https://doi.org/10.1177/154193128603000616>
- Klein, G. A., Wolf, S., Militello, L., & Zsombok, C. (1995). Characteristics of Skilled Option Generation in Chess. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 62(1), 63–69. <https://doi.org/10.1006/OBHD.1995.1031>
- Kluger, A. N., & DeNisi, A. (1996). The effects of feedback interventions on performance: A historical review, a meta-analysis, and a preliminary feedback intervention theory. *Psychological Bulletin*, 119(2), 254–284. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.119.2.254>
- Klüver, M., Herrigel, C., Heinrich, C., Schöner, H.-P., & Hecht, H. (2016). The behavioral validity of dual-task driving performance in fixed and moving base driving simulators. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 37, 78–96. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.12.005>
- Kok, E. M., & Jarodzka, H. (2017). Before your very eyes: The value and limitations of eye tracking in medical education. *Medical Education*, 51(1), 114–122.

<https://doi.org/10.1111/medu.13066>

- Kolb, A. Y., & Kolb, D. A. (2009). The Learning Way : Meta-cognitive Aspects of Experiential Learning. *Simulation & Gaming*, 40(3), 297–327. <https://doi.org/10.1177/1046878108325713>
- Kolb, A. Y., & Kolb, D. A. (2012). Experiential Learning Theory. In N. M. Seel (Ed.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (pp. 1215–1219). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_227
- Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. FT Press.
- Kolb, D. A., & Kolb, A. Y. (2012). Experiential Learning. In *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (pp. 1209–1209). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_4049
- Kontogiannis, T. (2006). Patterns of driver stress and coping strategies in a Greek sample and their relationship to aberrant behaviors and traffic accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 38(5), 913–924. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.03.002>
- Korteling, J., Helsdingen, A., & Baeyer, A. (2000). *Handbook of Low-Cost Simulators*.
- Krumpal, I. (2013). Determinants of social desirability bias in sensitive surveys: A literature review. *Quality and Quantity*, 47(4), 2025–2047. <https://doi.org/10.1007/s11135-011-9640-9>
- Kuiken, M., & Twisk, D. (2001). *Safe driving and the training of calibration*. *Literature Review*. Retrieved from <https://www.swov.nl/sites/default/files/publicaties/rapport/r-2001-29.pdf>
- Kulhavy, R. W. (1977). Feedback in Written Instruction. *Review of Educational Research*, 47(2), 211–232. <https://doi.org/10.3102/00346543047002211>
- Kulhavy, R. W., & Anderson, R. C. (1972). Delay-retention effect with multiple-choice tests. *Journal of Educational Psychology*, 63(5), 505–512. <https://doi.org/10.1037/h0033243>
- Kusano, K. D., Chen, R., Montgomery, J., & Gabler, H. C. (2015). Population distributions of time to collision at brake application during car following from naturalistic driving data. *Journal of Safety Research*, 54(June), 95.e29-104. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2015.06.011>
- Land, M. F. (1992). Predictable eye-head coordination during driving. *Nature*, 359(6393), 318–320. <https://doi.org/10.1038/359318a0>
- Le Roux, B., & Rouanet, H. (2010). *Multiple correspondence analysis*. SAGE.
- Lee, D. N. (1976). A Theory of Visual Control of Braking Based on Information about Time-to-Collision. *Perception*, 5(4), 437–459. <https://doi.org/10.1068/p050437>
- Lee, S. E., Klauer, S. G., Olsen, E. C. B., Simons-Morton, B. G., Dingus, T. A., Ramsey, D. J., & Ouimet, M. C. (2008). Detection of Road Hazards by Novice Teen and Experienced Adult Drivers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2078(1), 26–32. <https://doi.org/10.3141/2078-04>
- Lee, S. E., Simons-Morton, B. G., Klauer, S. E., Ouimet, M. C., & Dingus, T. A. (2011). Naturalistic assessment of novice teenage crash experience. *Accident Analysis and Prevention*, 43(4), 1472–1479. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.02.026>
- Leibowitz, H. W., & Owens, D. A. (1977). Nighttime Driving Accidents and Selective Visual

Degradation. *Science*, 197(4302), 422–423.
<https://doi.org/10.1126/science.197.4302.422-a>

- Leplat, J. (2005). Les automatismes dans l'activité : pour une réhabilitation et un bon usage. *Activités*, 2(2), 43–68.
- Leplat, J., & Montmollin (de), M. (2001). *Les compétences en ergonomie* (Octarès). Toulouse.
- Lerner, N. D. (1993). Brake Perception-Reaction Times of Older and Younger Drivers. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 37(2), 206–210. <https://doi.org/10.1177/154193129303700211>
- Li, Q., Guo, F., Klauer, S. G., & Simons-Morton, B. G. (2017). Evaluation of risk change-point for novice teenage drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 108(August), 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.08.007>
- Lucidi, F., Giannini, A. M., Sgalla, R., Mallia, L., Devoto, A., & Reichmann, S. (2010). Young novice driver subtypes: Relationship to driving violations, errors and lapses. *Accident Analysis and Prevention*, 42(6), 1689–1696. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.04.008>
- Lucidi, F., Russo, P. M., Mallia, L., Devoto, A., Lauriola, M., & Violani, C. (2006). Sleep-related car crashes: Risk perception and decision-making processes in young drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2), 302–309. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.09.013>
- Luft, C. D. B. (2014). Learning from feedback: The neural mechanisms of feedback processing facilitating better performance. *Behavioural Brain Research*, 261, 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2013.12.043>
- Luk, J. W., Worley, M. J., Winiger, E., Trim, R. S., Hopfer, C. J., Hewitt, J. K., ... Wall, T. L. (2016). Risky driving and sexual behaviors as developmental outcomes of co-occurring substance use and antisocial behavior. *Drug and Alcohol Dependence*, 169, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2016.10.006>
- Ma, R., & Kaber, D. (2005). Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(10), 939–953. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.04.002>
- Ma, R., & Kaber, D. (2007). Situation awareness and driving performance in a simulated navigation task. *Ergonomics*, 50(8), 1351–1364. <https://doi.org/10.1177/154193120605000313>
- Machin, M. A., & Sankey, K. S. (2008). Relationships between young drivers' personality characteristics, risk perceptions, and driving behaviour. *Accident Analysis and Prevention*, 40(2), 541–547. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.08.010>
- Malone, S., & Brünken, R. (2015). Hazard perception assessment – How much ecological validity is necessary? *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 2769–2776. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.713>
- Marottoli, R. A., & Richardson, E. D. (1998). Confidence in, and self-rating of, driving ability among older drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 30(3), 331–336. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(97\)00100-0](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(97)00100-0)
- Massie, D. L., Campbell, K. L., & Williams, A. F. (1995). Traffic Accident involvement rates by driver age and gender. *Accident Analysis and Prevention*, 27(1), 73–87. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)00050-V](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)00050-V)
- Mayer, R., & Wittrock, M. (1996). *Problem-solving transfer*. *Handbook of educational*

psychology. Retrieved from <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=TjDIqzrfYaMC&oi=fnd&pg=PA47&dq=problem+solving+transfer+mayer&ots=AAuIrUMCmI&sig=zD8yVjg7sCbFBQNvM7aubVz0fTI>

- Mayhew, D. R. (2003). The learner's permit. *Journal of Safety Research*, 34(1), 35–43. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12535904>
- Mayhew, D. R., Simpson, H. M., Desmond, K., & Williams, A. F. (2003). Specific and long-term effects of Nova Scotia's graduated licensing program. *Traffic Injury Prevention*, 4(2), 91–97. <https://doi.org/10.1080/15389580309866>
- Mayhew, D. R., Simpson, H. M., & Pak, A. (2003). Changes in collision rates among novice drivers during the first months of driving. *Accident Analysis & Prevention*, 35(5), 683–691. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00047-7)
- Mayhew, D. R., Simpson, H. M., & Singhal, D. (2005). *Best practices for graduated driver licensing in Canada*. Ottawa, Ontario. Retrieved from http://assets.ibc.ca/Documents/Auto Insurance/graduated_licensing/TIRF-fullreportGDL-oct2005.pdf
- McCartt, A. T., Shabanova, V. I., & Leaf, W. a. (2003). Driving experience, crashes and traffic citations of teenage beginning drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 35(3), 311–320. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00006-4)
- McDonald, C. C., Curry, A. E., Kandadai, V., Sommers, M. S., & Winston, F. K. (2014). Comparison of teen and adult driver crash scenarios in a nationally representative sample of serious crashes. *Accident; Analysis and Prevention*, 72, 302–308. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.07.016>
- McDonald, C. C., Goodwin, A. H., Pradhan, A. K., Romoser, M. R. E., & Williams, A. F. (2015). A Review of Hazard Anticipation Training Programs for Young Drivers. *Journal of Adolescent Health*, 57(1), S15–S23. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2015.02.013>
- McDonald, C. C., Tanenbaum, J. B., Lee, Y.-C., Fisher, D. L., Mayhew, D. R., & Winston, F. K. (2012). Using Crash Data to Develop Simulator Scenarios for Assessing Novice Driver Performance. *Transportation Research Record*, 2321, 73–78. <https://doi.org/10.3141/2321-10>
- McGwin, Jr, G., & Brown, D. B. (1999). Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged, and older drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 31(3), 181–198. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(98\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(98)00061-X)
- McKenna, F. P. (1993). It won't happen to me: Unrealistic optimism or illusion of control? *British Journal of Psychology*, 84(1), 39–50. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1993.tb02461.x>
- Mcknight, A. J., & Adams, B. B. (1970). *Driver education task analysis. Volume II: Task analysis methods*. Alexandria.
- Mcknight, A. J., & Hundt, A. G. (1971). *Driver education task analysis. Volume III: Instructional Objectives*. Alexandria.
- McKnight, J. A., & McKnight, S. A. (2003). Young novice drivers: Careless or clueless? *Accident Analysis and Prevention*, 35(6), 921–925. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00100-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00100-8)
- Michon, J. A. (1985). a Critical View of Driver Behavior Models : What Do We Know , What

- Should We Do? *Human Behavior and Traffic Safety*, (New York: Plenum Press), 485–520. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
- Milleville-Pennel, I., & Charron, C. (2015). Do mental workload and presence experienced when driving a real car predispose drivers to simulator sickness? An exploratory study. *Accident Analysis and Prevention*, *74*, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.10.021>
- Minderhoud, M. M., & Bovy, P. H. L. (2001). Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. *Accident Analysis and Prevention*, *33*(1), 89–97. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00019-1)
- Miyata, S., Noda, A., Ozaki, N., Hara, Y., Minoshima, M., Iwamoto, K., ... Koike, Y. (2010). Insufficient sleep impairs driving performance and cognitive function. *Neuroscience Letters*, *469*(2), 229–233. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.12.001>
- Moon, J. (2004). *A Handbook of Reflective and Experiential Learning: Theory and Practice*. *Theory and Practice*. <https://doi.org/ISBN-10:0415335167>
- Moreno-Roldán, E., Lardelli-Claret, P., Jiménez-Mejías, E., Molina-Soberanes, D., Martín-delosReyes, L. M., & Martínez-Ruiz, V. (2018). Efficacy of training with driving simulators in improving safety in young novice or learner drivers: A systematic review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *62*, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.12.006>
- Morris, T. H. (2019). Experiential learning—a systematic review and revision of Kolb’s model. *Interactive Learning Environments*, *0*(0), 1–14. <https://doi.org/10.1080/10494820.2019.1570279>
- Mourant, R. R., & Rockwell, T. H. (1972). Strategies of Visual Search by Novice and Experienced Drivers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *14*(4), 325–335. <https://doi.org/10.1177/001872087201400405>
- Mundutéguy, C., & Darses, F. (2007). *Perception et anticipation du comportement d’autrui en situation simulée de conduite automobile*. *Le Travail Humain* (Vol. 70). <https://doi.org/10.3917/th.701.0001>
- Munduteguy, C., & Ragot-Court, I. (2011). A contribution to situation awareness analysis: understanding how mismatched expectations affect road safety. *Human Factors*, *53*(6), 687–702. <https://doi.org/10.1177/0018720811420841>
- Mynttinen, S., Sundström, A., Koivukoski, M., Hakuli, K., Keskinen, E., & Henriksson, W. (2009). Are novice drivers overconfident? A comparison of self-assessed and examiner-assessed driver competences in a Finnish and Swedish sample. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *12*(2), 120–130. <https://doi.org/10.1016/J.TRF.2008.09.002>
- Mynttinen, S., Sundström, A., Vissers, J., Koivukoski, M., Hakuli, K., & Keskinen, E. (2009). Self-assessed driver competence among novice drivers – a comparison of driving test candidate assessments and examiner assessments in a Dutch and Finnish sample. *Journal of Safety Research*, *40*(4), 301–309. <https://doi.org/10.1016/J.JSR.2009.04.006>
- Neboit, M. (1978). SIMULATION ET APPRENTISSAGE DE LA CONDUITE AUTOMOBILE. *Le Travail Humain*, *41*(2), 239–249. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/40657105>
- NHTSA. (2015). Traffic Safety Facts - Distracted Driving 2013. *US Department of Transportation*, (April), 1–6. <https://doi.org/DOT HS 811 379>

- Nordbakke, S., & Sagberg, F. (2007). Sleepy at the wheel: Knowledge, symptoms and behaviour among car drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2006.03.003>
- Nyberg, A., Gregersen, N. P., & Wiklund, M. (2007). Practicing in relation to the outcome of the driving test. *Accident Analysis and Prevention*, 39(1), 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.06.015>
- ONISR. (2017). *la sécurité routière en france: Bilan de l'accidentalité de l'année 2016*. Paris. Retrieved from www.securite-routiere.gouv.fr
- Oron-Gilad, T., & Parmet, Y. (2014). Can a driving simulator assess the effectiveness of Hazard Perception training in young novice drivers? *Advances in Transportation Studies an International Journal*, 1, 1–65. <https://doi.org/10.4399/97888548735447>
- Owsley, C., & McGwin, G. (2010). Vision and driving. *Vision Research*, 50(23), 2348–2361. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.05.021>
- Panteli, M., & Kirschen, D. S. (2015). Situation awareness in power systems: Theory , challenges and applications. *Electric Power Systems Research*, 122, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2015.01.008>
- Paterson, J., & Dawson, D. (2016). Fatigue and road safety for Young and Novice Drivers. In *Handbook of teen and novice drivers : research, practice, policy, and directions* (pp. 229–238). Retrieved from https://books.google.fr/books?id=tBYNDgAAQBAJ&pg=PA229&lpg=PA229&dq=Fatigue+and+Road+Safety+for+Young+and+Novice+Drivers&source=bl&ots=A3rxGL8LYg&sig=_W5yEeRv45FunNp0AMA8p2ET0K8&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwiV8ZDP_vzWAhXnA8AKHTbtC3IQ6AEIUTAF#v=onepage&q&f=false
- Pavlov, I. P. (1927). Conditioned reflexes: An investigation of the physiological activity of the cerebral cortex. *Annals of Neurosciences*, 17(3). <https://doi.org/10.5214/ans.0972-7531.1017309>
- Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2014). Mental workload and driving. *Frontiers in Psychology*, 5(December), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01344>
- Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2015). Overload depending on driving experience and situation complexity: Which strategies faced with a pedestrian crossing? *Applied Ergonomics*, 51, 343–349. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.014>
- Penning, R., Veldstra, J., Daamen, A., Olivier, B., & Verster, J. (2010). Drugs of Abuse, Driving and Traffic Safety. *Current Drug Abuse Reviewse*, 3(1), 23–32. <https://doi.org/10.2174/1874473711003010023>
- Perkins, D., & Salomon, G. (1992). Transfer of Learning. In *International Encyclopedia of Education, Second Edition*. Oxford. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0273229710000110>
- Peters, B., & Nilsson, L. (2007). Modelling the Driver in Control. In *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments* (pp. 85–104). London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-618-6_5
- Petzoldt, T., Weiß, T., Franke, T., Krems, J. F., & Bannert, M. (2013). Can driver education be improved by computer based training of cognitive skills? *Accident Analysis and Prevention*, 50, 1185–1192. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.09.016>
- Pickrell, T. M. (2015). Driver Electronic Device Use in 2013. *Traffic Safety Facts - Research*

Note. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/1353214>

- Pollatsek, A., Narayanaan, V., Pradhan, A., & Fisher, D. L. (2006). Using Eye Movements to Evaluate a PC-Based Risk Awareness and Perception Training Program on a Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48(3), 447–464. <https://doi.org/10.1518/001872006778606787>
- Pradhan, A. K., Fisher, D. L., & Pollatsek, A. (2006). Risk perception training for novice drivers: evaluating duration of effects of training on a driving simulator. ... *Research Record: Journal ...*, 1969(1), 58–64. <https://doi.org/10.3141/1969-10>
- Pradhan, A. K., Hammel, K. R., DeRamus, R., Pollatsek, A., David, A., Noyce, D. a, & Fisher, D. L. (2005). Using eye movements to evaluate effects of driver age on risk perception in a driving simulator. *Human Factors*, 47(4), 840–852. <https://doi.org/10.1518/001872005775570961>
- Pradhan, A. K., Pollatsek, A., Knodler, M., & Fisher, D. L. (2009). Can younger drivers be trained to scan for information that will reduce their risk in roadway traffic scenarios that are hard to identify as hazardous? *Ergonomics*, 52(6), 657–673. <https://doi.org/10.1080/00140130802550232>
- Pradhan, A. K., Simons-Morton, B. G., Lee, S. E., & Klauer, S. G. (2011). Hazard Perception and Distraction in Novice Drivers: Effects of 12 Months Driving Experience. In *Proceedings of the sixth international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design* (p. pp 614-620).
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(3), 257–266. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313160>
- Reason, J. T., Manstead, A., Stradling, S., Baxter, J., & Campbell, K. (1990). Errors and violations on the roads: a real distinction? *Ergonomics*, 33(10–11), 1315–1332. <https://doi.org/10.1080/00140139008925335>
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2003). Mental workload while driving: effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology. Applied*, 9(2), 119–137. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.9.2.119>
- Reyna, V. F., & Farley, F. (2006). Risk and Rationality in Adolescent Decision Making Implications for Theory, Practice, and Public Policy. *Psychological Science in the Public Interest*, 7(1), 1–44. Retrieved from http://www.human.cornell.edu/hd/reyna/upload/2006-Reyna_Farley_RiskAndRationalityArt.pdf
- Richman, W. L., Kiesler, S., Weisband, S., & Drasgow, F. (1999). A meta-analytic study of social desirability distortion in computer-administered questionnaires, traditional questionnaires, and interviews. *Journal of Applied Psychology*, 84(5), 754–775. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.84.5.754>
- Roberts, R., Flin, R., & Cleland, J. (2015). “Everything was fine”*: An analysis of the drill crew’s situation awareness on Deepwater Horizon. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 38, 87–100. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.08.008>
- Rolfe, J. M., & Caro, P. W. (1982). Determining the training effectiveness of flight simulators: Some basic issues and practical developments. *Applied Ergonomics*, 13(4), 243–250. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(82\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0003-6870(82)90063-1)
- Roman, G. D., Poulter, D., Barker, E., Mckenna, F. P., & Rowe, R. (2015). Novice drivers’

- individual trajectories of driver behavior over the first three years of driving. *Accident Analysis and Prevention*, 82, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.05.012>
- Romer, D., Reyna, V. F., & Satterthwaite, T. D. (2017). Beyond stereotypes of adolescent risk taking: Placing the adolescent brain in developmental context. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 27(May), 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.07.007>
- Rosenman, E. D., Dixon, A. J., Webb, J. M., Broliar, S., Golden, S. J., Jones, K. A., ... Fernandez, R. (2018). A Simulation-based Approach to Measuring Team Situational Awareness in Emergency Medicine: A Multicenter, Observational Study. *Academic Emergency Medicine*, 25(2), 196–204. <https://doi.org/10.1111/acem.13257>
- Sagberg, F., & Bjørnskau, T. (2006). Hazard perception and driving experience among novice drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 38(2), 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.10.014>
- Salmon, P. M., Stanton, N. a., & Young, K. L. (2012). Situation awareness on the road: review, theoretical and methodological issues, and future directions. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 13(4), 472–492. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2010.539289>
- Salomoni, P., Prandi, C., Rocchetti, M., Casanova, L., Marchetti, L., & Marfia, G. (2017). Diegetic user interfaces for virtual environments with HMDs: a user experience study with oculus rift. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 11(2), 173–184. <https://doi.org/10.1007/s12193-016-0236-5>
- Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. (2000). Identifying Fixations and Saccades in Eye-Tracking Protocols. *Proceedings of the Eye Tracking Research and Applications Symposium*, 71–78. <https://doi.org/10.1145/355017.355028>
- Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1991). Situation Awareness: A Critical But Ill-Defined Phenomenon. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(1), 45–57. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0101_4
- Scott-Parker, B., Watson, B., & King, M. J. (2009). Understanding the psychosocial factors influencing the risky behaviour of young drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(6), 470–482. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2009.08.003>
- Scott-Parker, B., Watson, B., King, M. J., & Hyde, M. K. (2013). A further exploration of sensation seeking propensity, reward sensitivity, depression, anxiety, and the risky behaviour of young novice drivers in a structural equation model. *Accident Analysis and Prevention*, 50, 465–471. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.05.027>
- Seacrist, T., Douglas, E. C., Huang, E., Megariotis, J., Prabahar, A., Kashem, A., ... Loeb, H. (2018). Analysis of near crashes among teen, young adult, and experienced adult drivers using the SHRP2 naturalistic driving study. *Traffic Injury Prevention*, 19(sup1), S89–S96. <https://doi.org/10.1080/15389588.2017.1415433>
- Seel, N. (2012). Transfer of Learning. In *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (pp. 3337–3341). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_166
- Shepherd, J. L., Lane, D. J., Tapscott, R. L., & Gentile, D. A. (2011). Susceptible to Social Influence: Risky “Driving” in Response to Peer Pressure. *Journal of Applied Social Psychology*, 41(4), 773–797. <https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.2011.00735.x>
- Shope, J. T. (2007). Graduated driver licensing: Review of evaluation results since 2002. *Journal of Safety Research*, 38(2), 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.02.004>
- Shute, V. J. (2008). Focus on Formative Feedback. *Review of Educational Research*, 78(1),

153–189. <https://doi.org/10.3102/0034654307313795>

- Siegrist, S., Rainer, C., Delhomme, P., Kaba, A., Mäkinen, T., & Sagberg, F. (1999). *GADGET: Guarding Automobile Drivers through Guidance, Education and Technology*. Vienne. Retrieved from http://healthdocbox.com/Psychology_and_Psychiatry/69670375-Gadget-guarding-automobile-drivers-through-guidance-education-and-technology-final-report.html
- Simons-Morton, B., & Ehsani, J. (2016). Learning to Drive Safely: Reasonable Expectations and Future Directions for the Learner Period. *Safety*, 2(4), 20. <https://doi.org/10.3390/safety2040020>
- Simons-Morton, B. G., Ehsani, J., Gershon, P., Klauer, S., & Dingus, T. (2017). Teen Driving Risk and Prevention: Naturalistic Driving Research Contributions and Challenges. *Safety*, 3(4), 29. <https://doi.org/10.3390/safety3040029>
- Simons-Morton, B. G., Lerner, N., & Singer, J. (2005). The observed effects of teenage passengers on the risky driving behavior of teenage drivers. *Accident; Analysis and Prevention*, 37(6), 973–982. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.04.014>
- Simons-Morton, B. G., Ouimet, M. C., Zhang, Z., Klauer, S. E., Lee, S. E., Wang, J., ... Dingus, T. A. (2011). The effect of passengers and risk-taking friends on risky driving and crashes/near crashes among novice teenagers. *The Journal of Adolescent Health : Official Publication of the Society for Adolescent Medicine*, 49(6), 587–593. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2011.02.009>
- Smith, A. R., Chein, J., & Steinberg, L. (2014). Peers increase adolescent risk taking even when the probabilities of negative outcomes are known. *Developmental Psychology*, 50(5), 1564–1568. <https://doi.org/10.1037/a0035696>
- Smith, E. M., Ford, J. K., & Kozlowski, S. W. J. (1997). Building adaptive expertise: Implications for training design strategies. In *Training for a rapidly changing workplace: Applications of psychological research*. (pp. 89–118). <https://doi.org/10.1037/10260-004>
- Smith, S. S., Horswill, M. S., Chambers, B., & Wetton, M. (2009). Hazard perception in novice and experienced drivers: The effects of sleepiness. *Accident Analysis and Prevention*, 41(4), 729–733. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.03.016>
- Sneddon, A., Mearns, K., & Flin, R. (2013). Stress, fatigue, situation awareness and safety in offshore drilling crews. *Safety Science*, 56, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.05.027>
- Souriau, E., & Souriau, A. (1990). *Vocabulaire d'esthétique* (PUF). Paris.
- Stahl, P., Donmez, B., & Jamieson, G. A. (2014). Anticipation in driving: The role of experience in the efficacy of pre-event conflict cues. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 44(5), 603–613. <https://doi.org/10.1109/THMS.2014.2325558>
- Stanisław Jurecki, R., Lech Stańczyk, T., & Jacek Jaśkiewicz, M. (2017). Driver's reaction time in a simulated, complex road incident. *Transport*, 32(1), 44–54. <https://doi.org/10.3846/16484142.2014.913535>
- Stanton, N. A., Salmon, P. M., Walker, G. H., Salas, E., & Hancock, P. A. (2017). State-of-science: situation awareness in individuals, teams and systems. *Ergonomics*, 60(4), 449–466. <https://doi.org/10.1080/00140139.2017.1278796>
- Stefanova, T., Burkhardt, J.-M., Filtness, A., Wullems, C., Rakotonirainy, A., & Delhomme, P. (2015). Systems-based approach to investigate unsafe pedestrian behaviour at level

- crossings. *Accident; Analysis and Prevention*, 81, 167–186. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.04.001>
- Stefanova, T., Burkhardt, J.-M., Wullems, C., Freeman, J., Rakotonirainy, A., & Delhomme, P. (2015). Direct Observations of Pedestrian Unsafe Crossing at Urban Australian Level Crossings. *Urban Rail Transit*, 1(2), 112–130. <https://doi.org/10.1007/s40864-015-0022-9>
- Steinberg, L. (2007). Risk Taking in Adolescence. *Current Directions in Psychological Science*, 16(2), 55–59. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00475.x>
- Stephens, A. N., Hill, T., & Sullman, M. J. M. (2016). Driving anger in Ukraine: Appraisals, not trait driving anger, predict anger intensity while driving. *Accident Analysis and Prevention*, 88, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.11.017>
- Sullman, M. J. M. (2015). The expression of anger on the road. *Safety Science*, 72, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.013>
- Summala, H. (2014). Brake Reaction Times and Driver Behavior Analysis Brake Reaction Times and. *Transportation Human Factors*, (June 2014), 217–226. <https://doi.org/10.1207/STHF0203>
- Summala, H., & Koivisto, I. (1990). Unalerted drivers' brake reaction times: older drivers compensate their slower reactions by driving more slowly. In *Driving behaviour in a social context*. Retrieved from https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Unalerted+drivers'+brake+reaction+times%3A+Older+drivers+compensate+their+slower+reaction+times+by+driving+more+slowly&btnG=
- Sundström, A. (2008). Self-assessment of driving skill - A review from a measurement perspective. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2007.05.002>
- Tanaka, N., & Takagi, H. (2004). Virtual reality environment design of managing both presence and virtual reality sickness. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 23(6), 313–317. <https://doi.org/10.2114/jpa.23.313>
- Tanida, K., & Pöppel, E. (2006). A hierarchical model of operational anticipation windows in driving an automobile. *Cognitive Processing*, 7(4), 275–287. <https://doi.org/10.1007/s10339-006-0152-9>
- Taoka, G. T. (1989). Brake reaction times of unalerted drivers. *ITE Journal*, 19–21.
- Taubman – Ben-Ari, O., Lotan, T., & Prato, C. G. (2017). Young male drivers' risky driving 15 months after licensure – The role of intervention, attitudes towards accompanied driving, and parents' risk. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 51, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.09.005>
- Taylor, T., Masserang, K. M., Pradhan, A. K., Divekar, G., Samuel, S., Muttart, J., ... Fisher, D. L. (2011). Long-Term Effects of Hazard Anticipation Training on Novice Drivers Measured on the Open Road. *Proceedings of the Sixth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. NIH Public Access. Retrieved from </pmc/articles/PMC4180240/?report=abstract>
- Taylor, T., Pradhan, A. K., Divekar, G., Romoser, M., Muttart, J., Gomez, R., ... Fisher, D. L. (2013). The view from the road: The contribution of on-road glance-monitoring technologies to understanding driver behavior. *Accident Analysis and Prevention*, 58, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.02.008>

- The University of Iowa. (2015). Overview & Capabilities : The National Advanced Driving Simulator. Retrieved from https://www.nads-sc.uiowa.edu/media/pdf/Overview_2015.pdf
- Thorndike, E. L. (1898). Animal Intelligence. *Nature*, 58(1504), 390–390. <https://doi.org/10.1038/058390b0>
- Tomaske, W. (1999). A Modular Automobile Road Simulator MARS for on and off-Road conditions. In *DSC '99 : Driving simulation conference* (pp. 413–424). Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=1373178>
- Twisk, D. a M., & Stacey, C. (2007). Trends in young driver risk and countermeasures in European countries. *Journal of Safety Research*, 38(2), 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.03.006>
- UK Department For Transport. (2015). *Reported Road Casualties Great Britain: 2014 Annual Report*. London.
- Underwood, G. (2007). Visual attention and the transition from novice to advanced driver. *Ergonomics*, 50(8), 1235–1249. <https://doi.org/10.1080/00140130701318707>
- Underwood, G., Chapman, P., Bowden, K., & Crundall, D. (2002). Visual search while driving: Skill and awareness during inspection of the scene. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(2), 87–97. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(02\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(02)00008-6)
- Underwood, G., Chapman, P. R., Brocklehurst, N., Underwood, J., & Crundall, D. (2003). Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers. *Ergonomics*, 46(6), 629–646. <https://doi.org/10.1080/0014013031000090116>
- Underwood, G., Crundall, D., & Chapman, P. (2011). Driving simulator validation with hazard perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(6), 435–446. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2011.04.008>
- Underwood, G., Ngai, A., & Underwood, J. (2013). Driving experience and situation awareness in hazard detection. *Safety Science*, 56, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.05.025>
- Underwood, G., Phelps, N., Wright, C., Van Loon, E., & Galpin, A. (2005). Eye fixation scanpaths of younger and older drivers in a hazard perception task. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 25(4), 346–356. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2005.00290.x>
- Unverricht, J., Samuel, S., & Yamani, Y. (2018). Latent Hazard Anticipation in Young Drivers: Review and Meta-Analysis of Training Studies. *Transportation Research Record*, (May). <https://doi.org/10.1177/0361198118768530>
- Van der Kleij, F. M., Feskens, R. C. W., & Eggen, T. J. H. M. (2015). Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes. *Review of Educational Research*, 85(4), 475–511. <https://doi.org/10.3102/0034654314564881>
- Van Hoorn, J., Crone, E. A., & Van Leijenhorst, L. (2017). Hanging Out With the Right Crowd: Peer Influence on Risk-Taking Behavior in Adolescence. *Journal of Research on Adolescence*, 27(1), 189–200. <https://doi.org/10.1111/jora.12265>
- van Leeuwen, P. M., Happee, R., & de Winter, J. C. F. (2015). Changes of Driving Performance and Gaze Behavior of Novice drivers During a 30-min Simulator-based Training. *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 3325–3332. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.422>
- Van Merriënboer, J. J. G., & Sweller, J. (2005). *Cognitive load theory and complex learning*:

- Recent developments and future directions. Educational Psychology Review* (Vol. 17).
<https://doi.org/10.1007/s10648-005-3951-0>
- Van Winsum, W., & Heino, A. (1996). Choice of time-headway in car-following and the role of time-to-collision information in braking. *Ergonomics*, 39(4), 579–592.
<https://doi.org/10.1080/00140139608964482>
- Velichkovsky, B. M., Joos, M., Helmert, J. R., & Pannasch, S. (2005). Two Visual Systems and their Eye Movements : Evidence from Static and Dynamic Scene Perception. *Proceedings of the XXVII Conference of the Cognitive Science Society*, 2283–2288.
- Velichkovsky, B. M., Rothert, A., Kopf, M., Dornhoefer, S. M., & Joos, M. (2002). Towards an express diagnostics for level of processing and hazard perception. *Transportation Research, Part F*, 5(2), 145–156.
- Verster, J. C., & Roth, T. (2012). Predicting psychopharmacological drug effects on actual driving performance (SDLP) from psychometric tests measuring driving-related skills. *Psychopharmacology*, 220(2), 293–301. <https://doi.org/10.1007/s00213-011-2484-0>
- Vlakveld, W., Romoser, M., Mehranian, H., Diete, F., Pollatsek, A., & Fisher, D. L. (2011). Do Crashes and Near Crashes in Simulator-Based Training Enhance Novice Drivers' Visual Search for Latent Hazards? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2265(2), 153–160. <https://doi.org/10.3141/2265-17>
- Vollrath, M., Meilinger, T., & Krüger, H.-P. (2002). How the presence of passengers influences the risk of a collision with another vehicle. *Accident Analysis & Prevention*, 34(5), 649–654. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(01\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00064-1)
- Vygotsky. (1978). *Mind in Society. The Development of Higher Psychological Processes*.
- Wahlstrom, D., Collins, P., & White, T. (2010). Developmental changes in dopamine neurotransmission in adolescence: Behavioral implications and issues in assessment. *Brain and Cognition*, 72(1), 146–159. <https://doi.org/10.1016/J.BANDC.2009.10.013>
- Walter, H., Vetter, S. C., Grothe, J., Wunderlich, A. P., Hahn, S., & Spitzer, M. (2001). The neural correlates of driving. *NeuroReport*, 12(8), 1763–1767.
<https://doi.org/10.1097/00001756-200106130-00049>
- Wang, Y., Zhang, W., & Salvendy, G. (2010). Effects of a simulation-based training intervention on novice drivers' hazard handling performance. *Traffic Injury Prevention*, 11(1), 16–24. <https://doi.org/10.1080/15389580903390631>
- Watling, C. N. (2014). Sleepy driving and pulling over for a rest: Investigating individual factors that contribute to these driving behaviours. *Personality and Individual Differences*, 56, 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2013.08.031>
- Watling, C. N., Armstrong, K. A., Obst, P. L., & Smith, S. S. (2014). Continuing to drive while sleepy: The influence of sleepiness countermeasures, motivation for driving sleepy, and risk perception. *Accident Analysis and Prevention*, 73, 262–268.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.09.021>
- Watling, C. N., Armstrong, K. A., Smith, S. S., & Wilson, A. (2016). The on-road experiences and awareness of sleepiness in a sample of Australian highway drivers: A roadside driver sleepiness study. *Traffic Injury Prevention*, 17(1), 24–30.
<https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1033690>
- Wedel, M., & Pieters, R. (2008). A Review of Eye-Tracking Research in Marketing. In N. K. Malhotra (Ed.), *Review of Marketing Research*. Retrieved from

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.460.487&rep=rep1&type=pdf#page=144>

- Weiss, H. B., Kaplan, S., & Prato, C. G. (2014). Analysis of factors associated with injury severity in crashes involving young New Zealand drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 65(4), 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.12.020>
- Wertheimer, M. (1959). *Productive Thinking* (Harper & R). New York. <https://doi.org/10.1192/bjp.109.463.834>
- Westerman, S. ., & Haigney, D. (2000). Individual differences in driver stress, error and violation. *Personality and Individual Differences*, 29(5), 981–998. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(99\)00249-4](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(99)00249-4)
- Wickens, C. M., Toplak, M. E., & Wiesenthal, D. L. (2008). Cognitive failures as predictors of driving errors, lapses, and violations. *Accident Analysis and Prevention*, 40(3), 1223–1233. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.01.006>
- Wilde, G. J. S. (1976). Social Interaction Patterns in Driver Behavior: An Introductory Review. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 18(5), 477–492. <https://doi.org/10.1177/001872087601800506>
- Williams, A. F. (2013). Motor Vehicle Crashes and Injuries Involving Teenage Drivers: Future Directions for Research. *Transportation Research E-Circular*, (E-C180), 44p. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec180.pdf>
- Williams, A. F., & Carsten, O. (1989). Driver age and crash involvement. *American Journal of Public Health*, 79(3), 326–327. <https://doi.org/10.2105/AJPH.79.3.326>
- Williams, A. F., McCartt, A. T., Mayhew, D. R., & Watson, B. (2013). Licensing age issues: deliberations from a workshop devoted to this topic. *Traffic Injury Prevention*, 14(3), 237–243. <https://doi.org/10.1080/15389588.2012.702249>
- Williamson, A., Friswell, R., Olivier, J., & Grzebieta, R. (2014). Are drivers aware of sleepiness and increasing crash risk while driving? *Accident Analysis and Prevention*, 70, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.04.007>
- Wittorski, R. (1998). De la fabrication des compétences. *Éducation Permanente*, (135), 57–69. <https://doi.org/hal-0017696>
- World Health Organization. (2015). *Global status report on road safety. Injury prevention*. Geneva. https://doi.org/http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/
- Wulf, G., & Shea, C. H. (2004). Understanding the role of augmented feedback. In *Skill acquisition in sport: Research, theory and practice*. Retrieved from <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=Tm-BAGAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA121&dq=wulf+shea+2004&ots=Yv00fgvMLR&sig=Zfn2SKYGE3unOsKEZCPSmnh3j-Q>
- Yantis, S., & Jonides, J. (1984). Abrupt visual onsets and selective attention: evidence from visual search. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 10(5), 601–621. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6238122>
- Yantis, S., & Jonides, J. (1990). Abrupt Visual Onsets and Selective Attention: Voluntary Versus Automatic Allocation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(1), 121–134. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.1.121>

- Yeung, J. S., & Wong, Y. D. (2015). Effects of driver age and experience in abrupt-onset hazards. *Accident Analysis and Prevention*, 78, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.02.024>
- Zhang, T., Chan, A. H. S., Ba, Y., & Zhang, W. (2016). Situational driving anger, driving performance and allocation of visual attention. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 42, 376–388. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.05.008>
- Zhang, T., Chan, A. H. S., & Zhang, W. (2015). Dimensions of driving anger and their relationships with aberrant driving. *Accident Analysis and Prevention*, 81, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.05.005>
- Zicat, E., Bennett, J. M., Chekaluk, E., & Batchelor, J. (2018). Cognitive function and young drivers: The relationship between driving, attitudes, personality and cognition. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 55, 341–352. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.03.013>

Liste des figures

- Figure 1, taux d'accidents (en nombre d'accidents par 10k miles parcourus) chez des conducteurs âgés de 16 à 18 ans, en fonction des mois de conduite accumulés (à gauche), et du nombre cumulé de miles parcourus (à droite) après l'obtention du permis – tiré de McCartt et al. (2003) 14
- Figure 2, modèle hiérarchique de l'activité de conduite adapté de Michon (1985). A droite, caractérisation de la performance à l'aide des trois continuums des caractéristiques temporelles, cognitives / sensori-motrice et du degré d'automatisation 22
- Figure 3, le cycle de l'apprentissage expérientiel. Tiré de Kolb & Kolb (2012)..... 31
- Figure 4, schéma de synthèse des compétences de haut niveau, de leurs interrelations et de leurs rôles pour maîtriser les risques et assurer l'efficacité de la conduite – basé sur le modèle de l'évaluation de la situation de FLIN et al., (2008) et sur les modèles de la prise de décision de Klein (1986, 2008) et Flin (2008). Boîtes bleues : compétences ; boîtes rouges : facteurs de risque associés à la conduite. Flèches bleues : effets des compétences d'évaluation sur les compétences de décision et de gestion des ressources personnelles ; flèches vertes : effets des buts du conducteur sur le déploiement des compétences flèches pointillées bleues : effets des compétences sur le déploiement d'autres compétences ; flèches pointillées rouges : influence des facteurs de risque sur le déploiement des compétences ; flèches noires : effet des compétences sur la situation et le contexte de la conduite ; flèches noires creuses : effet rétroactif du déploiement des compétences sur les compétences d'évaluation du conducteur 38
- Figure 5, modèle de l'évaluation de la situation (tiré de Endsley, 1995b)..... 39
- Figure 6, modèle de la prise de décision dynamique (tiré de Flin et al., 2008)..... 41
- Figure 7, Schéma (tiré de Fuller, 2005) représentant les contrôles réactif (à gauche) et anticipatoire (à droite) sur la vitesse du conducteur (jaune), en fonction de la demande de la tâche (rose) et du temps (abscisse). La demande de la tâche est déterminée par la configuration routière (ex. rond-point VS. Ligne droite) et le comportement des autres usagers. Les unités de vitesse ne sont pas précisées par l'auteur 42
- Figure 8, architecture d'un simulateur de conduite pour la formation (d'après Fan, 2015) 51
- Figure 9, exemples de simulateurs haute immersion. A gauche, le NADS-1 de l'IOWA U (crédit: The University of Iowa, 2015) ; à droite le Simulateur pleine échelle 360° de l'IFSTTAR, site de Satory 52
- Figure 10, A gauche un simulateur moyenne immersion à 3 écrans de la société DEVELTER © (crédit : http://www.develter.com/simulateurs-conduite-_1_FR_r_40.html) ; à droite un simulateur basse immersion mono-écran (crédit : <https://www.lyonmag.com> et The Good Drive ©)..... 52
- Figure 11, dispositif utilisé par Van Leeuwen et al., (2015). A gauche le simulateur moyenne fidélité utilisé, à droite le circuit d'entraînement. Tiré de Van Leeuwen et al., (2015) 60
- Figure 12, exemple de situation « par erreur » passive. En blanc, la voiture de l'apprenant – tiré de Wang et al. (2010)..... 60
- Figure 13, exemple de situation « par erreur » active. En bleu, la voiture de l'apprenant – tiré de Ivancic & Hesketh (2000) 60

Figure 14, tâche d'identification de dangers dans le cadre du RAPT. Cercles rouges : zones à identifier par les apprenants – tirée de Pradhan et al. (2006)	60
Figure 15, dispositif utilisé par Allen et al., (2010). De gauche à droite, simulateur mono-écran, 3 écrans, pleine échelle	62
Figure 16, cycle de l'apprentissage de l'apprenant recevant une rétroaction, tiré de Shute (2008) et Bangert-Drowns et al., (1991)	64
Figure 17, exemple de rétroaction extradiégétique en « vue du dessus ». à gauche, les zones à risques de la situation représentées par des cercles. A droite, la zone « aveugle » susceptible de cacher un danger dans la situation. Des explications en voix-off peuvent compléter ces informations graphiques – tiré de Pollatsek et al. (2006).....	68
Figure 18, exemple de situations similaires, tirées de Allen et al. (2011). A gauche, la situation d'entraînement en milieu rural, à droite, la situation de test en milieu urbain.	75
Figure 19, exemple de situations d'entraînement (à gauche) et de test proche (à droite), tirés de Wang et al., (2010)	75
Figure 20, exemple de situations d'entraînement (à gauche) et de test lointaine (à droite), tirés de Vlakveld et al., (2011)	76
Figure 21, exemple de situations d'entraînement (à gauche) et de test adaptée (à droite), tirés de Ivancic et Hesketh (2000).....	76
Figure 22, exemple de scénario couvert de type « mobile ou potentiellement mobile ». En bleu, la voiture du conducteur dont les compétences sont évaluées	79
Figure 23, exemple de scénario couvert de type statique. En bleu, la voiture du conducteur dont les compétences sont évaluées.....	79
Figure 24, exemple de scénario ouvert de type « piéton ». En bleu, la voiture du conducteur dont les compétences sont évaluées.....	80
Figure 25, exemple de scénario ouvert de type « véhicule ». En bleu, la voiture du conducteur dont les compétences sont évaluées.....	80
Figure 26, exemple de situation d'intrusion	81
Figure 27, carte d'exploration visuelle de situations urbaines contenant un danger et des situations normales. En abscisse les degrés horizontaux d'exploration visuelle. En ordonnées, les degrés verticaux d'exploration visuelle– tirés de Chapman & Underwood, 1998	84
Figure 28, variations de vitesse de conducteurs entraînés aux compétences perceptives et cognitives et de conducteur novices – tirés de Crundall et al., 2010	88
Figure 29, nuage des variables actives des deux axes retenus sur le plan en deux dimensions.....	108
Figure 30, Simulateur pleine échelle IFSTTAR - Satory	121
Figure 31, fenêtre temporelle d'observation des données oculométriques et de freinages (pédalier)	124
Figure 32, fenêtre temporelle d'observation des données de variations de vitesse....	125
Figure 33, variations de vitesse en coefficient d'accélération relatif, pour chaque situation test. En gris, le moment d'apparition du danger.....	132

Figure 34, Coefficients d'accélération relatifs des conducteurs novices et expérimentés en fonction du temps (en seconde) pour la situation d'intrusion. L'apparition du danger (D) est signalée par une bande grise, correspond au moment de l'apparition du danger.....	133
Figure 35, Coefficients d'accélération relatifs des conducteurs novices et expérimentés en fonction du temps (en seconde) pour la situation couverte 1. L'apparition du danger (D) est signalée par une bande grise, correspond au moment de l'apparition du danger.....	134
Figure 36, Coefficients d'accélération relatifs des conducteurs novices et expérimentés en fonction du temps (en seconde) pour la situation couverte2. L'apparition du danger (D) est signalée par une bande grise, correspond au moment de l'apparition du danger.....	135
Figure 37, différences expérimentés/novices pour le délai entre la dernière fixation sur l'indice du danger, et la première fixation sur le danger dans les situations test couvertes...	136
Figure 38, pourcentages de la fenêtre danger écoulé pour chaque type d'indicateur, par type de situation. Avec barres d'erreur. * = $p < 0,05$	137
Figure 39, plus faible TTC moyen observé par situation (en seconde), avec barres d'erreur. * = $p < 0,05$	138
Figure 40, différences entre scénarios couvertes camion et haie. Les différences sont exprimées en un pourcentage écoulé de la fenêtre correspondante, excepté pour le pire TTC moyen, dont la différence est exprimée en seconde. * = $p < 0,05$	138
Figure 41, Coefficients d'accélération relatifs pour les deux catégories de conducteur, ainsi que les différences de coefficient d'accélération entre conducteurs novices et expérimentés. Ils sont accompagnés des résultats des ANOVA pratiquées.....	139
Figure 42, différences expérimentés/novices dans la situation ouverte. * = $p < 0,05$..	140
Figure 43, modèle de l'évaluation et de la prise de décision anticipatoire opérationnelle, en situation de conduite dynamique et complexe.....	143
Figure 44, photographie du simulateur à base fixe HDR utilisé pour l'expérimentation	151
Figure 45, fenêtre temporelle d'observation des variations de vitesse.....	155
Figure 46, vue d'ensemble des Coefficients d'accélération relatifs identifiés dans les scénarios test, avec différences significatives inter-types de rétroactions	159
Figure 47, distances (en m) entre le dernier freinage et le lieu du danger, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$	160
Figure 48, situation similaire ouverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale); les flèches oranges indiquent les différences significatives entre conducteurs entraînés et non entraînés; les flèches grises indiquent les différences significatives entre conducteurs ayant reçu le protocole extradiégétique et les conducteurs de la non entraînés. Les différences sont données en valeur absolue	161
Figure 49, nombre de freinage moyen par groupe de conducteur, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$	162
Figure 50, situation similaire ouverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale); Les flèches gris foncé indiquent les différences significatives entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et conducteur ayant reçu la rétroaction intradiégétique; les flèches grises indiquent les différences significatives	

entre conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et les conducteurs non entraînés.	163
Figure 51, Durées de freinages moyens par groupe de conducteur, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$	165
Figure 52, Distances (en m) entre le dernier appui sur la pédale d'accélérateur et le lieu du danger, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$	165
Figure 53, Distances (en m) entre la dernière accélération et le premier freinage, avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$	165
Figure 54, situation proche ouverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale) ; Les flèches jaunes indiquent les différences significatives entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et conducteur ayant reçu la rétroaction intradiégétique ; les flèches grises indiquent les différences significatives entre conducteurs ayant reçu la rétroaction extradiégétique et les conducteurs non entraînés ; les flèches oranges indiquent les différences significatives entre conducteurs entraînés et non- entraînés.	166
Figure 55, Durées totale de freinage (en seconde), avec barres d'erreurs. * = $p < 0,05$	167
Figure 56, Situation proche couverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale) ; la flèche jaune indique la différences significatives entre les conducteurs ayant reçu la rétroaction intradiégétique et les conducteurs non entraînés. Les différences sont exprimées en valeurs absolues.	168
Figure 57, Situation lointaine ouverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale)	169
Figure 58, Situation lointaine couverte – variations de vitesse par groupe de conducteur (en pourcentage de la vitesse initiale)	169
Figure 59, schéma de la prise de décision tactique et opérationnelle anticipatoire en conduite. Les flèches bleu clair indiquent l'influence de l'évaluation de la situation sur les prises de décisions. Les flèches bleu foncé indiquent l'influence rétroactive des prises de décisions sur l'évaluation de la situation. Les flèches noires indiquent l'effet des prises de décision sur la situation de conduite.....	173
Figure 60, schéma de synthèse des compétences de haut niveau, de leurs interrelations et de leurs rôles pour maîtriser les risques et assurer l'efficacité de la conduite – version mise à jour et simplifiée. Boîtes bleues : compétences ; boîtes rouges : facteurs de risque associés à la conduite. Flèches bleues : effets des compétences d'évaluation sur les compétences de décision et de gestion des ressources personnelles ; flèches pointillées bleues : effets des compétences sur le déploiement d'autres compétences ; flèches pointillées rouges : influence des facteurs de risque sur le déploiement des compétences ; flèches noires : effet des compétences sur la situation et le contexte de la conduite ; flèches noires creuses : effet rétroactif du déploiement des compétences sur les compétences d'évaluation du conducteur	183

Liste des tableaux

Tableau 1, Matrice Goals for Driver's Education (GDE), adaptée de Hatakka et al. (2002), Assailly (2016, 2013)	25
Tableau 2, dimensions de criticité des situations d'apprentissage	32
Tableau 3, apports de la sécurité et de la flexibilité des simulateurs de conduite pour l'apprentissage des compétences	34
Tableau 4, types d'erreur commises par les conducteurs novices (basé sur Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018)	47
Tableau 5, types situations dangereuses rencontrés par les conducteurs novices (basé sur Braitman et al., 2008; McDonald et al., 2014; McKnight & McKnight, 2003; Seacrist et al., 2018)	48
Tableau 6, Formations « par simulateur »	56
Tableau 7, Formations dispensées par un biais tiers	59
Tableau 8, types de situations de transfert utilisés pour évaluer l'efficacité de l'apprentissage en simulateur de conduite	74
Tableau 9, types de situations utilisées pour évaluer les compétences de conduite perceptives et cognitives des conducteurs	78
Tableau 10, exemples d'indicateurs oculométriques utilisés pour mesurer les compétences d'évaluation, avec intervalles de valeurs observées par catégorie de conducteur	87
Tableau 11, Classification des situations et valeurs de référence des temps de réaction au freinage de Green, 2000	89
Tableau 12, compétences mesurées en fonction des indicateurs et des types situations contenant un danger	91
Tableau 13, Guide d'entretien semi-structuré comprenant les instructions initiale et finale (1 & 2), ainsi que les questions supplémentaires (a, b, c, d, e & f)	100
Tableau 14, extrait de l'incident 34 par le participant 14 (21 ans, 9 mois de conduite autonome)	101
Tableau 15, conditions de conduite, avec catégories correspondantes et modalités associées	102
Tableau 16, éléments déclencheurs et facteurs causaux, avec exemples de verbatims et de [modalités associées]	102
Tableau 17, compétences apprises, avec exemples de verbatims	103
Tableau 18, Tableau utilisé pour réaliser l'ACM. Les cases gris clair contiennent les variables actives, les cases gris clair les variables passives	104
Tableau 19, Éléments déclencheurs, facteurs causaux et développements des compétences de conduite de haut niveau rapportés par les conducteurs novices interrogés.	106
Tableau 20, coordonnées et contribution des variables actives aux deux axes	107
Tableau 21, incidents typiques de la gauche (A1 et A2) et de la droite (B) de l'axe 1 « autoévaluation-ressources / Perception »	109

Tableau 22, incidents typiques du haut (A) et du bas (B) de l'axe 2 « compréhension-projection/ décision »	110
Tableau 23, ordre de passage des circuits contrebalancé entre les participants	119
Tableau 24, distribution et caractéristiques de l'échantillon de conducteurs recruté. L'âge est exprimé en années, le temps depuis l'obtention du permis (tps), en mois.	120
Tableau 25, situations tests retenus pour l'expérimentation.	122
Tableau 26, résumé des indicateurs utilisés pour les situations test couvertes et ouverte. Les indicateurs marqués d'un * ne concernent que les situations test couvertes	127
Tableau 27, résumé des indicateurs utilisés dans la situation contrôle d'intrusion....	128
Tableau 28, différences de vitesse initiale (en km/h) entre conducteurs expérimentés et novices par situations	131
Tableau 29, situations utilisées pour l'entraînement des compétences	152
Tableau 30, situations tests utilisées pour évaluer les compétences	153
Tableau 31, indicateurs utilisés pour les situations test, avec méthodes de calcul....	157
Tableau 32, vitesses initiales (en km/h) par type de rétroaction reçu, avec tests d'inférences sur la différence	158



AVIS DU COMITE POUR LES RECHERCHES IMPLIQUANT LA PERSONNE HUMAINE
sur le protocole de recherche intitulé « Utilisation d'un simulateur de conduite en réalité virtuelle à
taille réelle pour l'évaluation des différences de compétences non techniques de conduite, en
fonction de l'expérience de la conduite autonome »
(Valentin CORNELOUP – LPC)

Le Comité pour les recherches impliquant la personne humaine (CRPH) de l'Ifsttar a examiné le protocole de recherche susmentionné lors de sa séance du 22 mars 2017.

Après examen du protocole, le Comité a émis les remarques suivantes :

- Le Comité constate une incompréhension au sujet du processus d'obtention du consentement des personnes participant à la recherche. Par hypothèse, l'information est préalable au recrutement des participants. Elle sert à leur permettre d'accepter ou de refuser de prendre part à l'expérimentation. Et si la personne est d'accord, elle exprime sa volonté en signant le formulaire de consentement.

Le recueil du consentement est une obligation pour le chercheur qui ne peut faire prendre part à sa recherche que des personnes ayant donné leur accord. Pour autant, il ne doit pas être obtenu à tout prix, la possibilité de refuser la proposition faite à l'issue de la phase d'information devant être laissée à chaque personne sollicitée.

A la lecture du protocole, ces personnes semblent déjà être recrutées, puisqu'elles sont qualifiées de « participants », si bien qu'une étape essentielle est manquante.

Le CRPH recommande qu'à l'issue de la phase de publicité, le formulaire d'information soit transmis immédiatement aux personnes qui se font connaître, en leur laissant un délai suffisant pour en prendre connaissance et réfléchir avant de se présenter dans les locaux de l'Ifsttar, où il leur sera demandé si elles ont besoin d'autres informations et si elles acceptent ou refusent de participer à l'expérimentation.

- Dans la phase de recrutement des personnes, les modalités de recrutement doivent être précisées.

- Le Comité s'interroge sur l'absence de précisions sur l'objectif de la recherche aussi bien dans la notice d'information que dans le formulaire de consentement. Si cette imprécision est intentionnelle pour ne pas influencer sur les résultats, il est envisageable de limiter l'information. En effet dans ce cas, l'objectif de la recherche, sa méthodologie peuvent ne faire l'objet que d'une information succincte. Cependant, à l'issue de l'expérimentation, les personnes qui s'y sont prêtées doivent recevoir une information complète sur cette recherche même si elles ne l'ont pas demandé. Par principe, l'objectif de la recherche doit être rappelé dans les documents qui leur seront remis afin que l'information soit la plus complète possible. Il convient de leur expliquer le but et l'importance de la recherche et non simplement de leur présenter ce qu'elles auront à faire. De manière générale, la notice d'information est souvent trop succincte.

La notice d'information et le formulaire de consentement doivent comporter les mêmes informations.

La « conductance cutanée » est citée dans le formulaire de consentement alors qu'elle est absente dans la notice d'information. Cependant, Le Comité tient à saluer le soin pris dans la construction de ce projet ainsi que dans la description des tenants et aboutissements.

Rév. 01/03/16

- S'agissant d'une recherche sur un simulateur, le Comité se demande si toutes les précautions ont-été prises en cas d'intolérance au simulateur.

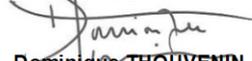
- Le Comité suggère de prévoir une phase de récupération en raison des effets de l'expérimentation sur simulateur chez certaines personnes (recalage perceptif, déséquilibres, etc.).

- Les personnes participant à la recherche ne sont pas seulement titulaires du droit d'accès à leurs données personnelles. La loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés leur reconnaît également un droit de rectification ainsi qu'un droit d'opposition pour des motifs légitimes, qu'il convient de rappeler dans la notice d'information et dans le formulaire de consentement. Pour que l'exercice de ces droits soit effectif, l'adresse professionnelle de la personne à contacter (en sus de l'identité, du numéro de téléphone et de l'adresse email) devra être mentionnée dans ces documents.

Quelques corrections ont par ailleurs été apportées dans le corps du protocole, ci-joint.

Au regard des éléments qui lui ont été soumis, le Comité considère que cette recherche ne relève pas des articles L.1121-1 et suivants du code de la santé publique dans la mesure où la recherche n'est pas réalisée en vue du développement des connaissances biologiques ou médicales. Un comité de protection des personnes (CPP) n'a donc pas à être saisi pour avis.

Le 28 mars 2017



Dominique THOUVENIN,
présidente du CRPH

Étude 2 – formulaire d'informations et de consentement



INFORMATIONS RELATIVES A L'EXPERIMENTATION ET MODALITÉS DE DELIVRANCE DE CETTE INFORMATION

Utilisation d'un simulateur de conduite à taille réelle, pour l'évaluation des compétences de conduite de haut niveau, en fonction de l'expérience de conduite.

L'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), en tant que responsable de cette étude, vous propose de participer à une recherche qui porte sur l'évaluation des compétences de conduite de haut niveau des conducteurs via l'utilisation d'un simulateur de conduite à taille réelle.

Description de l'expérimentation : Vous aurez à effectuer plusieurs parcours de conduite en réalité virtuelle, sur un simulateur à taille réelle. Les expérimentateurs vous équiperont d'un ensemble de capteurs physiologiques et d'un dispositif oculométrique pour que soient mesurés à tout instant vos variables cardio respiratoires, émotionnelles, la position de votre regard et votre comportement de conduite. Ces informations seront utilisées à des fins de recherche pour évaluer vos compétences de conduite de haut niveau.

Votre participation d'une durée approximative de **2 heures** s'inscrit dans une étude s'étendant jusqu'au 30/12/2017. Vous percevrez une indemnité forfaitaire de **30 euros** en compensation des contraintes et frais générés par votre participation à cette recherche. Dans l'hypothèse où vous ne pourriez pas effectuer l'intégralité de l'expérimentation, l'indemnité perçue sera calculée au prorata du temps passé.

Les résultats individuels et les différentes données vous concernant seront strictement confidentiels. Conformément à l'article 40 de la loi « Informatique et libertés » (loi n° 78-17 du 6 Janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés), vous avez le droit d'accéder aux données vous concernant recueillies dans cette étude. Vous pourrez les obtenir en vous adressant à valentin.comeloup@ifsttar.fr. Vous disposez également d'un droit de rectification et d'un droit d'opposition à la transmission des données couvertes par le secret professionnel susceptibles d'être utilisées dans le cadre de cette recherche et de faire l'objet d'un traitement informatique.

Pour des raisons générales de protection des personnes, vous devez être affilié à la sécurité sociale.

L'Ifsttar a souscrit auprès d'Axa France Iard une assurance de responsabilité civile couvrant les conséquences dommageables éventuelles que vous pourriez subir du fait de votre participation au projet de recherche.

Nom et signature du responsable de la recherche :

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT LIBRE ET ÉCLAIRÉ

De M., Mme..... (Nom, Prénom)

Adresse :

J'ai été invité à participer à une étude réalisée par l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) concernant l'évaluation des compétences de conduite de haut niveau, via l'utilisation de la réalité virtuelle. J'ai été libre d'accepter ou de refuser.

J'ai reçu et compris les informations suivantes : J'effectuerai des parcours de conduite en réalité virtuelle, sur un simulateur de conduite à taille réelle, pour que l'on évalue à des fins de recherche mes compétences de conduite de haut niveau. Pour cela, je serai équipé d'un ensemble de capteurs physiologiques et d'un dispositif oculométrique pour que soient mesurées à tout instant : ma conductance cutanée, mes variations cardio respiratoires, la position de mon regard et mes comportements de conduite.

Les instructions détaillées concernant le déroulement du test me seront fournies lors de celui-ci par les personnes qui le mettront en œuvre.

Le but de cette étude est d'évaluer les compétences de conduite de haut niveau des conducteurs, en fonction de leur expérience de conduite. La nature de l'étude, son déroulement et ses contraintes m'ont été expliqués par les expérimentateurs. J'ai reçu une réponse satisfaisante à toutes les questions que j'ai pu poser librement à propos de celle-ci.

J'accepte de participer à cette étude dans les conditions précisées ci-dessus.

Mon consentement ne décharge pas les organisateurs de l'étude de leurs responsabilités. Je conserve tous mes droits garantis par la loi. Si je le désire, je suis libre à tout moment d'arrêter ma participation ; j'en informerai alors le responsable de l'étude.

Les données me concernant resteront strictement confidentielles. Je n'autorise leur consultation et leur traitement informatique que par des personnes qui collaborent à l'étude. J'ai bien noté que le droit d'accès prévu par l'article 40 de la loi « Informatique et libertés » (loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés) est applicable à tout moment (texte disponible auprès de valentin.corneloup@ifsttar.fr).

Je percevrai une indemnité forfaitaire de 30 euros en compensation des contraintes et frais générés par ma participation à cette recherche. Dans le cas où je demanderais à mettre fin à ma participation avant la fin de l'expérimentation, cette indemnité serait calculée au prorata de la durée de ma participation.

Date manuscrite :

Signature de la personne :

Étude 2 – Questionnaire d'inclusion, voir : <https://forms.gle/aJaTyPDbJ1uTyeX77> pour questionnaire complet

12/04/2019

Questionnaire d'inclusion étude 2

Questionnaire d'inclusion étude 2

- Vous vous apprêtez à remplir un questionnaire d'inclusion pour participer à une expérience scientifique proposée par le Laboratoire de Psychologie des Comportements et des mobilités (LPC) de l'IFSTTAR, situé au 25 allée des marronniers, 78000 Versailles

- La participation est rémunérée à hauteur de 30 euros et dure environ 1h.

- Vous aurez à effectuer 4 circuits en réalité virtuelle d'une dizaine de minutes chacun, sur un simulateur de conduite.

***Obligatoire**

1. Date *

Exemple : 15 décembre 2012

2. Heure *

Exemple : 8 h 30

3. Quel âge avez vous ? *

Une seule réponse possible.

Moins de 30 ans

Plus de 30 ans *Passez à "Désolé, vous ne pouvez pas participer à notre étude".*

A quel point ressentez vous les symptômes suivants lorsque vous êtes passage d'un véhicule ?

4. Malaise général *

Une seule réponse possible.

1 2 3 4
Rien à signaler Sévère

5. Fatigue *

Une seule réponse possible.

1 2 3 4
Rien à signaler Sévère

6. Mal de tête *

Une seule réponse possible.

1 2 3 4
Rien à signaler Sévère

Étude 2 – Questionnaire de renseignements, voir : <https://forms.gle/zBiz3STUxXjYkUe3A> - pour questionnaire complet

12/04/2019

Etude 2 : renseignements

Etude 2 : renseignements

Bonjour,

Cette étude a pour objectif d'étudier la tâche de conduite, à l'aide de la réalité virtuelle

Ce questionnaire est anonyme.

Selon les questions posées, cochez la case correspondant à votre réponse ou écrivez votre réponse dans l'espace réservé.

Pour que notre travail soit efficace, nous avons besoin de réponses sincères qui correspondent à ce que vous ressentez vraiment. La participation n'est pas obligatoire et peut être stoppée à tout moment.

Il faut environ 10-15 minutes pour compléter ce questionnaire.

Nous vous remercions de votre participation,

L'équipe de recherche de l'IFSTAR.

*Obligatoire

1. Adresse e-mail *

2. Participant n° (à remplir par l'expérimentateur) *

3. Ordre des circuits (à remplir par l'expérimentateur) *

Une seule réponse possible.

1 2 3

3 1 2

2 3 1

4. Date *

Exemple : 15 décembre 2012

5. Heure *

Exemple : 8 h 30

Renseignements signalétiques

6. Quelle est votre date de naissance ? *

Exemple : 15 décembre 2012

Étude 3 – avis CRPH



AVIS DU COMITE POUR LES RECHERCHES IMPLIQUANT LA PERSONNE HUMAINE

SEANCE DU 9 AVRIL 2018

sur le protocole de recherche intitulé « Utilisation d'un simulateur de conduite pour l'évaluation de méthodes interactives pour l'apprentissage des compétences de conduite de haut niveau, chez le conducteur novice »

Valentin CORNELOUP – LPC

Le Comité pour les recherches impliquant la personne humaine (CRPH) de l'Ifsttar a examiné le protocole de recherche susmentionné lors de sa séance du 9 avril 2018.

Le Comité note que l'information donnée aux participants avant l'expérimentation sera partielle. Il rappelle que dans un tel cas :

- seules les informations pouvant générer un biais dans les résultats doivent être ainsi réservées ;
- il faut préciser dans le document d'information et dans le formulaire de consentement que seule une partie des informations n'est fournie afin de ne pas influencer sur les résultats ;
- en revanche l'information complète devra leur être donnée à l'issue de l'expérimentation.

Des suggestions de rédaction ont par ailleurs été faites dans le corps du protocole, ci-joint, pour en faciliter la compréhension.

Ce protocole a pour objectif de comparer l'efficacité de deux méthodes de *feedbacks* (intra-diégétique par exposition et extra-diégétique textuelle) pour l'apprentissage de compétence de conduite de haut niveau en réalité virtuelle. Compte-tenu de cet objectif, ce protocole ne constitue pas une « recherche organisée et pratiquée sur l'être humain en vue du développement des connaissances biologiques ou médicales » au sens de l'article L1121-1 du code de la santé publique et ne relève donc pas des dispositions de cet article.

Le 25 avril 2018

SIGNÉ

Dominique THOUVENIN,
présidente du CRPH

Rév 01/03/16

Étude 3 – Informations et consentement



INFORMATIONS RELATIVES A L'EXPERIMENTATION ET MODALITÉS DE DELIVRANCE DE CETTE INFORMATION

Utilisation de la réalité virtuelle pour étudier la tâche de conduite

L'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), en tant que responsable de cette étude, vous propose de participer à une recherche qui porte sur l'**utilisation de la réalité virtuelle pour étudier la tâche de conduit**.

Description de l'expérimentation : Vous êtes passé dans l'une des trois conditions d'entraînement. S'il ne s'est rien passé pendant le premier circuit après le circuit de familiarisation (circuit d'entraînement), vous étiez dans la condition contrôle. Si durant le circuit d'entraînement, vous avez été confronté à des situations à risques, vous étiez dans la condition d'entraînement « réelle ». Si durant le circuit d'entraînement vous avez vu un message s'afficher, vous étiez dans la condition « formelle ».

Les effets du circuit d'entraînement sur votre conduite ont été enregistrés durant le dernier circuit effectué.

L'objectif de l'étude est de comparer les effets de chaque type d'entraînement sur la gestion de situations potentiellement à risque.

Votre participation d'une durée approximative de **45 minutes à 1 heure** s'inscrit dans une étude s'étendant jusqu'au 06/07/2018. Vous percevrez une indemnité de **20 euros** en compensation des contraintes et frais générés par votre participation à cette recherche.

Les résultats individuels et les différentes données vous concernant seront strictement confidentiels. Conformément à l'article 40 de la loi « Informatique et libertés » (loi n° 78-17 du 6 Janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés), vous avez le droit d'accéder aux données vous concernant recueillies dans cette étude. Vous pourrez les obtenir en vous adressant à valentin.comeloup@ifsttar.fr. Vous disposez également d'un droit de rectification et d'un droit d'opposition à la transmission des données couvertes par le secret professionnel susceptibles d'être utilisées dans le cadre de cette recherche et de faire l'objet d'un traitement informatique.

Pour des raisons générales de protection des personnes, vous devez être affilié à la sécurité sociale.

L'Ifsttar a souscrit auprès d'Axa France Iard une assurance de responsabilité civile couvrant les conséquences dommageables éventuelles que vous pourriez subir du fait de votre participation au projet de recherche.

Nom et signature du responsable de la recherche :

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT LIBRE ET ÉCLAIRÉ
--

De M., Mme..... (Nom, Prénom)

Adresse :

J'ai été invité à participer à une étude réalisée par l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR).

J'ai reçu et compris les informations suivantes : J'effectuerai des parcours de conduite en réalité virtuelle, sur un simulateur de conduite. J'effectuerais d'abord un circuit de familiarisation, puis je conduirai successivement sur deux circuits d'une dizaine de minute chacun. Entre les deux derniers circuits, je remplirai un questionnaire informatisé.

La passation complète durera entre **45 minutes et une heure** et sera rémunérée **20 euros**.

Pour ne pas influencer les résultats de l'expérimentation, j'ai bien reçu l'information que je serai informé des tenants et aboutissants de cette dernière après avoir effectué les circuits.

Les instructions détaillées concernant le déroulement du test me seront fournies lors de celui-ci par les personnes qui le mettront en œuvre.

La nature de l'étude, son déroulement et ses contraintes m'ont été expliqués par les expérimentateurs. J'ai reçu une réponse satisfaisante à toutes les questions que j'ai pu poser librement à propos de celle-ci.

J'accepte de participer à cette étude dans les conditions précisées ci-dessus.

Mon consentement ne décharge pas les organisateurs de l'étude de leurs responsabilités. Je conserve tous mes droits garantis par la loi. Si je le désire, je suis libre à tout moment d'arrêter ma participation ; j'en informerai alors le responsable de l'étude.

Les données me concernant resteront strictement confidentielles. Je n'autorise leur consultation et leur traitement informatique que par des personnes qui collaborent à l'étude. J'ai bien noté que le droit d'accès prévu par l'article 40 de la loi « Informatique et libertés » (loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés) est applicable à tout moment (texte disponible auprès de valentin.corneloup@ifsttar.fr).

Je percevrai une indemnité forfaitaire de 30 euros en compensation des contraintes et frais générés par ma participation à cette recherche. Dans le cas où je demanderais à mettre fin à ma participation avant la fin de l'expérimentation, cette indemnité serait calculée au prorata de la durée de ma participation.

Date manuscrite :

Signature de la personne :

Étude 3 – Questionnaire d'inclusion, voir : <https://forms.gle/xG2mvUNivnJqa4s6A> - pour questionnaire complet

12/04/2019

Utilisation d'un simulateur de conduite pour l'étude de la tâche de conduite

Utilisation d'un simulateur de conduite pour l'étude de la tâche de conduite

- Vous vous apprêtez à remplir un questionnaire d'inclusion pour participer à une expérience scientifique proposée par le Laboratoire de Psychologie des Comportements et des mobilités (LPC) de l'IFSTTAR, situé au 14-20 boulevard newton, Champs-sur-Mame

- La participation est rémunérée à hauteur de 20 euros et dure environ 1h.

- Vous aurez à effectuer 3 circuits en réalité virtuelle d'une dizaine de minutes chacun, sur un simulateur de conduite.

*Obligatoire

1. Adresse e-mail *

Renseignements d'inclusion

Remplissez ce petit questionnaire pour savoir si vous pouvez participer à notre étude.

2. Quel âge avez vous ? *

Une seule réponse possible.

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

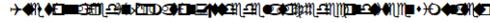
Mon âge n'est pas dans la liste *Passez à "Désolé, vous ne pouvez pas participer à notre étude :)".*

Utilisation d'un simulateur de conduite pour l'étude de la tâche de conduite

Vous aurez à effectuer 3 circuits en réalité virtuelle d'une dizaine de minutes chacun, sur un simulateur à taille réelle.

- Votre participation, d'une durée approximative de 1 heure, vous permettra de percevoir une indemnité forfaitaire de 20 euros, en compensation des contraintes et frais générés par votre déplacement sur notre site. Dans l'hypothèse où vous ne pourriez pas effectuer l'intégralité de

Étude 3 – Questionnaire de renseignements, voir : <https://forms.gle/5LFtLMY4XqdPRf5o6> - pour questionnaire complet



Questionnaire d'information: étude de la tâche de conduite en simulateur

Bonjour,

Cette étude a pour objectif d'étudier la tâche de conduite, à l'aide de la réalité virtuelle

Ce questionnaire est anonyme.

Selon les questions posées, cochez la case correspondant à votre réponse ou écrivez votre réponse dans l'espace réservé.

Pour que notre travail soit efficace, nous avons besoin de réponses sincères qui correspondent à ce que vous ressentez vraiment. La participation n'est pas obligatoire et peut être stoppée à tout moment.

Il faut environ 10-15 minutes pour compléter ce questionnaire.

Nous vous remercions de votre participation,

L'équipe de recherche de l'IFSTTAR.

*Obligatoire

1. Adresse e-mail *

Sans titre

2. Participant n° (à remplir par l'expérimentateur) *

3. Condition (à remplir par l'expérimentateur) *

Une seule réponse possible.

C1 All

ID1

ED1

4. Date *

Exemple : 15 décembre 2012

5. Heure *

Exemple : 8 h 30

Passez à la question 5.

Renseignements signalétiques

